Том 55, № 4, 2025
Vol. 55, № 4, 2025

ISSN 2074-9414
ISSN 2313-1748

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Food Processing: Techniques and Technology



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 brieves 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 Ingineering-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

Editor and Proofreader: E.A. Krivosheeva, K.A. Nikolaeva

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 December 25, 2025

Printed sheet 30.46 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, 2025

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ Издается с 1998 года **№ 4 (55)**
(FOOD PROCESSING: TECHNIQUES AND TECHNOLOGY) ISSN 2074-9414 (Print) ISSN 2313-1748 (Online) **2025** 16+

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

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

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

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

Главный редактор:

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

Зам. главного редактора:

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

Заушинцена 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: Е.А. Кривошеева, К.А. Николаева

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 25.12.25
Усл. п. л. 30,46. Тираж 500 экз.
Цена свободная. Выходит 4 раза в год

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

Регистрационный номер СМИ серия ПИ № ФС77-72313 выдан Роскомнадзор

© Составление, сопроводительный текст, редакционно-издательское оформление, Кемеровский государственный университет, 2025

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

Колонка главного редактора
https://fptt.ru

Пищевая и перерабатывающая промышленность – важная составляющая российского АПК – имеет стратегическое значение в обеспечении продовольственной безопасности страны и в текущих условиях демонстрирует способность устойчиво развиваться и обеспечивать внутренний рынок необходимыми объемами качественной продукции. Качество и безопасность продовольственного сырья и пищевых продуктов являются важными факторами, от которых зависит здоровье населения.

Изучением физических, химических и биологических свойств продуктов питания, а также процессов, связанных с их производством, обработкой и безопасностью, занимается пищевая наука и технология. Цель пищевой науки – улучшение качества и безопасности пищевых продуктов и разработка новых технологий в пищевой промышленности. Пищевая наука и технология сталкиваются с необходимостью решать широкий спектр проблем, связанных с физико-химическими свойствами продовольственного сырья, полуфабрикатов и готовых продуктов питания. Специалисты в области пищевых технологий должны понимать и предупреждать изменения, происходящие в продукте во время его производства, хранения и транспортировки, поскольку такие изменения оказывают влияние на качество питания.

С научной точки зрения, продовольственное сырье, полуфабрикаты и готовые продукты питания следует рассматривать как сложные пищевые системы (Complex Food Systems), которые характеризуются многокомпонентностью, многофазностью, динамичностью и выраженными структурно-функциональными взаимосвязями между их составляющими. Подход к пищевым продуктам как к сложным системам позволяет глубже понять их природу, оптимизировать их производство, повысить пищевую ценность и улучшить их влияние на здоровье человека.

Пищевые продукты – многокомпонентные гетерогенные смеси, состоящие из макронутриентов (белки, углеводы, липиды), микронутриентов (витамины, минералы, микроэлементы), воды, а также биоактивных соединений (антиоксиданты, фитонутриенты, ароматизаторы, пигменты) и, в случае ферментированных продуктов, микроорганизмов. При этом содержание нутриентов в продукте может составлять как несколько десятков процентов, так и малые доли процента. Поэтому исследование любой пищевой системы – сложная аналитическая задача, требующая проведения определенной исследовательской работы, в ходе которой в каждом конкретном случае необходимо приспосабливать стандартные методы к особенностям состава и физико-химической структуры продукта. Это хорошо прослеживается на примере работ, защищенных в диссертационном совете Кемеровского государственного университета.

В работе О. В. Козловой рассмотрены научные и практические аспекты создания новых биотехнологий производства синбиотических молочных продуктов, сочетающих пробиотики, пребиотики, и обогащенные метабиотиками, что повышает биологическую ценность и пользу для здоровья. А. Л. Майтаков в своей докторской диссертации, основываясь на теоретических расчетах и практических экспериментах, предложил технологию создания сухих гранулированных концентратов напитков с добавлением молочной сыворотки. И. С. Милентьева представила практическую реализацию технологий продуктов питания профилактической направленности на основе биопептидов молока. В работе К. В. Михайловой изучены причины возникновения пороков полутвердых сыров на пути «от фермы до прилавка», предложен механизм минимизации потерь. Полученные результаты демонстрируют стремление к инновациям, повышению эффективности производства, обеспечению продовольственной безопасности и удовлетворению растущих потребностей населения в высококачественных, здоровых и безопасных продуктах питания, особенно в молочной отрасли.

Качество пищевой продукции оценивают сложным комплексом характеристик, определяемых с помощью различных методов анализа. Методы анализа пищевых систем включают органолептические (оценка с помощью органов чувств: вкус, запах, цвет, консистенция) и измерительные (лабораторные) методы. Измерительные методы, в свою очередь, делятся на химические (качественный, количественный и элементный анализ), физико-химические (хроматография) и биологические (оценка пищевой ценности, микробная обсемененность). В результате анализа пищевых систем, содержащих большое количество компонентов, исследователи получают большой набор данных и множество спектральной информации, которые необходимо быстро и правильно обрабатывать, чтобы получать полезную информацию.

Сегодня происходит все более глубокое внедрение методов хемометрики во все области научного исследования, включая технологию и оценку качества пищевых продуктов. Хемометрика – сравнительно молодая, активно развивающаяся научная дисциплина, находящаяся на стыке химии и математики, предметом которой являются математические методы изучения химических явлений. Хемометрика прошла путь от узкого раздела аналитической химии до междисциплинарной науки, применяемой в биологии, медицине, пищевой промышленности и экологии.

Хемометрика становится незаменимым междисциплинарным инструментом в пищевой науке. Очевидно, что дальнейшее развитие пищевой промышленности и обеспечение продовольственной безопасности невозможно без внедрения современных аналитических методов. Успех и инновации в данной области напрямую зависят от тесного междисциплинарного сотрудничества, объединяющего знания и экспертизу специалистов по биологии, химии, математике и физике.

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



А. Ю. Просеков

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2601
https://elibrary.ru/JDVENF

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Диспергированные и тандемные повторы в геномах и генах некоторых видов млекопитающих

Г. Ю. Косовский, Т. Т. Глазко*

Научно-исследовательский институт пушного звероводства и кролиководства имени В. А. Афанасьева, пос. Родники, Россия

Поступила в редакцию: 12.08.2025
Принята после рецензирования: 05.09.2025
Принята к публикации: 07.10.2025

**e-mail: tglazko@rambler.ru*
© Г. Ю. Косовский, Т. Т. Глазко, 2025

Аннотация.
Развитие методов генного и геномного редактирования повышает актуальность прогноза и уменьшения вероятности нецелевых, плейотропных последствий. Одним из таких направлений может быть оценка структурно-функциональных особенностей геномных мишеней редактирования по наиболее полиморфным геномным элементам, таким как транспозоны. Цель исследования – выявить распределения транспозонов в генах, наиболее часто выбираемых в качестве мишеней генного редактирования, и на их флангах у разных видов млекопитающих.
Исследование выполнялось на геномных последовательностях человека (*Homo sapiens*), крупного рогатого скота (*Bos taurus*), домашнего кролика (*Oryctolagus cuniculus*) и домовой мыши (*Mus musculus*) белок-кодирующих генов миостатина (*mstn*), меланофилина (*mlph*), рецептора лептина (*lepr*), белка ремоделинга хроматина (хромосома X, *atrx*), генов эволюционно консервативной петли хроматина (фактор регуляции транскрипции – *auts2*, N-ацетилгалактозаминилтрансфераза – *galnt17*, кальций связывающий белок 1 – *caln1*), а также их флангов. Распределение транспозонов оценивали с использованием программы RepeatMasker, статистическую обработку выполняли с применением программы Jamovi. Рассматривались следующие генные и геномные особенности: частота встречаемости разных типов диспергированных повторов, доминирующих у предковых видов млекопитающих и затем вытесненных молодыми вариантами; зависимость частоты встречаемости разных повторов от локализации в аутосомах и хромосоме X, функциональной принадлежности групп генов, их локализации в общей и разных хромосомах, перекрывания генов.
Выявлены отличия по частотам встречаемости «древних» и «молодых» транспозонов между человеком, крупным рогатым скотом и грызунами, по-видимому, связанные с разной скоростью смены поколений; обнаружены ассоциации между функциями белков и консервативностью генетического сцепления между кодирующими их генами; генетически сцепленные гены у разных видов отличались по обогащенности «древними» транспозонами, что, предположительно, ассоциировано с видоспецифичными различиями в защищенности от транспозиций соответствующих геномных районов.
Полученные данные о видо- и ген-специфичных особенностях распределения транспозонов необходимо учитывать в целях предупреждения нежелательных эффектов редактирования соответствующих геномных районов.

Ключевые слова. Генное редактирование, генетическое сцепление, хроматиновая петля, эволюционная консервативность, «древние» и «молодые» транспозоны, человек, крупный рогатый скот, домашний кролик, домовая мышь

Финансирование. Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № 075-00503-25-02).

Для цитирования: Косовский Г. Ю., Глазко Т. Т. Диспергированные и тандемные повторы в геномах и генах некоторых видов млекопитающих. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 687–709. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2601

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2601
https://elibrary.ru/JDVENF

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

Dispersed and Tandem Repeats in Genomes and Genes of Some Mammalian Species

Gleb Yu. Kosovsky, Tatiana T. Glazko*

Scientific Research Institute of Fur Farming and Rabbit Breeding, Rodniki, Russia

Received: 12.08.2025
Revised: 05.09.2025
Accepted: 07.10.2025

**e-mail: tglazko@rambler.ru*
© G.Yu. Kosovsky, T.T. Glazko, 2025

Abstract.
Gene and genome editing improves the prognosis by preventing non-target or pleiotropic consequences. Genomic editing targets can be assessed by localizing their structural and functional traits on the most polymorphic genomic elements, e.g., by transposons. This research clarified the distribution of transposons in the most popular gene editing targets and on their flanks in different mammalian species.
The study covered the genomic sequences of humans (*Homo sapiens*), cattle (*Bos taurus*), domestic rabbits (*Oryctolagus cuniculus*), and house mice (*Mus musculus*). It involved the protein-coding genes of myostatin (*mstn*), melanophilin *(mlph*), leptin receptor (*lepr*), X-localized chromatin remodeling protein (*atrx*), and three genes in the evolutionarily conserved chromatin loop (transcription regulation factor – *auts2*, N-acetylgalactosaminyl transferase – *galnt17*, calcium binding protein 1 – *caln1*), as well as at least four genes on their flanks. The distribution of transposons was estimated using RepeatMasker; the statistical processing relied on the Jamovi software. The analysis was conducted for the following gene and genomic traits: 1) the frequency of dispersed repeats that were dominant in ancestral species to be displaced by later varieties; 2) the correlation between the frequency and the localization in autosomes and chromosome X, the functional affiliation of gene groups, their localization in the same and different chromosomes, and gene overlap.
The differences in the frequencies of ancient and young transposons between humans, cattle, and rodents were associated with different rates of generational exchange. The research also revealed some links between the protein functions and the conservatism of genetic linkage. The blocks of genetically linked genes across the species differed in ancient transposons, which depended on the species-specific differences in the protection of the corresponding genomic regions from transpositions.
The data on species- and gene-specific traits of transposons distribution may help to prevent undesirable pleiotropic effects of genetic modifications.

Keywords. Gene editing, genetic linkage, chromatin loop, evolutionary conservatism, ancient and young transposons, *Homo sapiens*, *Bos taurus*, *Oryctolagus cuniculus*, *Mus musculus*

Funding. The study is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state agreement No. 075-00503-25-02).

For citation: Kosovsky GYu, Glazko TT. Dispersed and Tandem Repeats in Genomes and Genes of Some Mammalian Species. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):687–709. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2601

Введение

Количество работ по редактированию генов и геномов у разных организмов резко увеличилось, центральными областями исследований в них являются медицинские проблемы и попытки увеличить эффективность ведения сельского хозяйства. Разрабатываются новые методы, расширяются знания о структуре генома, возможностях увеличения точности и предупреждения нежелательных последствий. Основным направлением являются разработки на платформе CRISPR. Идентифицированы нуклеазы, позволяющие адресно изменять ДНК в различных организмах; разработаны новые методы доставки их носителей к соответствующим мишеням, возможности не только адресного разрушения генов (нокаут), но и изменений регуляции их экспрессии (нокап, нокдаун и эпигенетическая модификация), точной вставки (нок-ин) и коррекции.

Прежде основным направлением в похожих исследованиях были проблемы увеличения точности адресной модификации и предупреждения нецелевых повреждений ДНК [1, 2]. В то же время вопросы нежелательных последствий генного редактирования остаются недостаточно исследованными из-за структурно-функциональных особенностей самих мишеней редактирования, несмотря на очевидные ограничения в фенотипических характеристиках и видовом разнообразии сельскохозяйственных животных,

успешно редактируемых до настоящего времени [3–5]. Связанные с особенностями геномной и генной организации методы прогноза последствий генного и геномного редактирования остаются недостаточно развитыми. К примерам попыток такого прогноза относятся работы, рассматривающие возможность нецелевых повреждений ДНК на основании регулярности распределения отдельных геномных фрагментов [6]. Однако эти работы носят скорее не прикладной, а поисковый характер.

Проблемы генного редактирования сельскохозяйственных животных традиционно усложняются тем, что большинство фенотипических признаков являются количественными и полигенными, со сложной иерархией межгенных взаимодействий. Кроме того, нежелательные фенотипические последствия генного и геномного редактирования, как правило, не публикуются. Исключением является созданный Международный консорциум по фенотипированию мышей (IMPC). Веб-портал предоставляет курируемые, интегрированные и проанализированные данные фенотипирования нокаутных мышей, состоящие из 85 млн точек данных и более 9500 статистически значимых совпадений фенотипов, сопоставленных с заболеваниями человека [7]. Но до сих пор остается неизвестным, насколько допустимо переносить результаты, полученные на домовой мыши, на другие виды млекопитающих. Более того, имеются данные, свидетельствующие о существенных отличиях между геномами человека и домовой мыши в скорости обновления, в частности, по различным транспозонам [8].

Транспозоны являются ключевыми факторами как организации архитектоники генетического материала в пространстве интерфазного ядра, так и программ генной экспрессии, лежащими в основах фенотипической изменчивости. Описано два основных способа, с помощью которых транспозоны регулируют экспрессию генов. Во-первых, транспозоны содержат цис-регуляторные последовательности со внутренними регуляторными свойствами для экспрессии генов, что делает их потенциальными факторами для регуляции экспрессии генов хозяина. Цис-регуляторные сайты, полученные из транспозонов, находятся в промоторных и энхансерных элементах. Они обеспечивают сайты связывания для широкого спектра трансдействующих факторов, особенно факторов регуляции транскрипции, так же как и формирования последовательностей кодирующих генов. Во-вторых, транспозоны кодируют регуляторные РНК, включая такие производные транспозонов, как miRNA, длинные некодирующие РНК (lncRNA) и ряд других [9–13]. Накопленные данные позволяют полагать, что геномные и генные особенности распределения транспозонов при подборе генов-мишеней редактирования могут иметь разные фенотипические последствия в зависимости от их представленности в геномной области редактирования.

Выполненные авторами исследования по генному редактированию у домашнего кролика гена рецептора лептина (*lepr*) [14], а также генов миостатина (*mstn*) и N-ацетилгалактозаминилтрансферазы (*galnt17*) позволили выявить различия в выживаемости потомства редактированных кроликов (неопубликованные данные). Предварительные данные показывают, что кролики, редактированные по гену *galnt17*, имеют повреждения, в частности лицевого черепа; по гену *mstn* – гибнут в раннем постнатальном периоде. Животные, редактированных по гену *lepr*, произвели потомство F1.

Ген *mlph*, например у домашнего кролика, вовлечен в повышенную изменчивость окраса доместицированных млекопитающих, по сравнению с близкородственными дикими видами [15].

Учитывая данные о том, что в эволюционно нестабильных по генетическому сцеплению блоках генов (ESB) обнаруживается высокая плотность транспозонов и микросателлитных локусов [16, 17], можно ожидать, что редактирование генов, лежащих в таких блоках, будут отличаться от принадлежащих к блокам HSB относительно пониженными плейотропными эффектами и повышенной плотностью локализации транспозонов.

В фенотипических последствиях генного редактирования, например гена *mstn* домашнего кролика, принимают участие регуляторные РНК – производные транспозонов, такие как кольцевая РНК и lncRNA [18].

В настоящей работе выполнены сравнения распределения диспергированных и тандемных повторов в генах *mstn*, *lepr*, *mlph* (успешно редактируемые у птиц [19]); трех генов, входящих в общую хроматиновую петлю у разных видов (фактор регуляции транскрипции – *auts2*, N-ацетилгалактозаминилтрансфераза – *galnt17*, кальций связывающий белок 1 – *caln1*); гена, локализованного в хромосоме X, кодирующего белок ремоделинга хроматина *atrx* (с относительно повышенным присутствием диспергированных повторов в связи с инактивацией у млекопитающих одной из хромосом X [8]).

По данным IMPC, последствия нок-аута этих генов у домовой мыши существенно отличаются от гена к гену: *atrx* приводит к эмбриональной летальности; *mlph* – тестировано 9 физиологических систем, нет повреждений; *galnt17* – тестировано 24 системы, обнаружены поведенческие изменения; *mstn* – тестировано 17 систем, изменения выявлены в 7; *lepr* – из 17 тестированных систем изменено 11. В исследованиях последствий нокаута *calnt17* у потомков мышей, полученных от скрещиваний лабораторных линий C57BL/6J × C3H/He F1 [20], авторы подчеркивают невозможность получения гомозигот по нокауту *calnt17* у линейных мышей C57BL/6J в связи с их массовой гибелью. Это произошло только у потомков мышей межлинейного скрещивания C57BL/6J × C3H/He F1. Такая зависимость от генотипической среды летальности нокаута по гену *calnt1*7 свидетельствует о сложности генных сетей с его участием.

Цель исследования – установить генные и геномные отличия распределения ключевых для регуляции генной экспрессии транспозонов у представителей разных отрядов млекопитающих (человек, крупный рогатый скот, домашний кролик и домовая мышь), что может быть существенным для учета особенностей мишеней при генном редактировании.

Объекты и методы исследования

Данные за 2024 г. взяты из Национального центра по биотехнологической информации (США), включенные в исследования: по генам человека версия *Homo sapiens* (human) GRCh38.p14 (GCF_000001405.40) (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCF_000001405.40/), крупного рогатого скота – версия *Bos taurus* (domestic cattle) ARS-UCD1.3 (GCF_002263795.3) (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCF_002263795.2/), домашнего кролика – версия *Oryctolagus cuniculus* (rabbit) mOryCun1.1 (GCF_964237555.1) (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/gene/100343360), домовой мыши – версия *Mus musculus* (house mouse) RS_2024_02 – GRCm39 (GCF_000001635.27) (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/gdv/browser/genome/?id=GCF_000001635.27).

С помощью программы RepeatMasker Института системной биологии (США) рассчитано количество неавтономных коротких диспергированных повторов SINE (short interspersed nuclear elements), автономных длинных диспергированных повторов LINE (long interspersed nuclear elements), эндогенных ретровирусов с длинными терминальными повторами (long terminal repeats – LTR, endogenous retroviruses – ERV), ДНК транспозоны (далее обозначенные как DNA) и микросателлиты (short tandem repeats – STR) – тандемные повторы с длиной элементарной единицы повтора в пределах от 1 до 6 пар нуклеотидов (п.н.). Повторы рассчитывались для каждого гена отдельно: для человека с использованием версии *Homo sapiens* – RepeatMasker Version 406; для крупного рогатого скота – *Bos taurus* – RepeatMasker Version 405; для домашнего кролика – *Oryctolagus cuniculus* – RepeatMasker Version 405; для домовой мыши – *Mus musculus* – RepeatMasker Version 405 [21].

Статистическая обработка данных выполнялась с использованием программ Jamovi и Excel.

Результаты и их обсуждение

Функциональные ассоциации генов, генетически сцепленных с генами – потенциальными мишенями генного редактирования. На начальном этапе исследования у четырех рассмотренных видов (человек, крупный рогатый скот, домашний кролик, домовая мышь) выполнен анализ постоянства генетического сцепления и порядка генов вокруг генов – системных регуляторов (например, меланофилин, миостатин, белок ремоделирования хроматина), рецепторной системы (рецептор лептина), трех генов, которые входят в общую хроматиновую петлю у разных видов, а также наличия или отсутствия функциональных взаимосвязей меду ними.

Гены, генетически тесно сцепленные у разных видов млекопитающих с геном меланофилина (mlph). COPS8 (COP9 Signalosome Subunit 8) – белок, формирующий ключевую субъединицу восьми субъединиц сигналосомы COP9, высококонсервативного белкового комплекса, регулирующего активности убиквитинлигазы посредством денедделяции куллина, каркаса для RING-белка (Ring Finger Protein 1, E3 Ubiquitin-Protein Ligase RING1) и рецепторного модуля субстратов, собирающихся в мультибелковый комплекс, действующий как убиквитинлигаза. Ковалентное присоединение убиквитиноподобного белка NEDD8 к остатку лизина в куллине происходит в процессе посттрансляционной модификации, напоминающей убиквитинирование. Эта модификация (неддиляция) необходима для активации куллиновых RING-лигаз. Обратный процесс, денедделяция куллина, катализируется сигналосомой COP9. Денеддирование куллина запускает своевременную разборку активного комплекса куллиновых RING-лигаз, освобождая их для формирования убиквитинирования новых белков-субстратов. Так, COPS8 выполняет ключевую роль в процессах убиквитинирования белков [22].

Убиквитин-протеасомная система (UPS) отвечает за деградацию большинства клеточных белков, являющихся либо нативными, либо неправильно свернутыми. Таким образом, правильное функционирование UPS имеет решающее значение как для белкового гомеостаза (протеостаза), так и для регуляции практически всех клеточных функций, в том числе и за формирование экзосом [23].

col6a3 (Collagen Type VI Alpha 3 Chain) кодирует одну из трех альфа-цепей коллагена VI типа, его глобулярные концевые домены связываются с белками внеклеточного матрикса.

Меланофилин (*mlph*) в меланоцитах участвует в переносе меланосом к концам дендритных ответвлений, из которых они путем эндоцитоза подхватываются кератиноцитами. Выявлена ключевая функция экспрессии меланофилина в панкреатических бета-клетках в процессе формирования и транспорта экзосом, несущих гранулы инсулина [24]. Описана высокая эволюционная консервативность доменов контакта с плазматической мембраной семейства синаптотагмин-подобных белков, например, меланофилина [25]. Обнаружена высокая экспрессия меланофилина в тучных клетках [26], предположительно, это эволюционно наиболее древние клеточные популяции царства животных, выполняющие функции нейроиммунных центров.

С *mlph* тесно сцеплены гены *prlh* (пролактин-рилизинг-гормон – элемент межнейронной сигнальной системы, нейромодулятор продуктов гипофиза) [27, 28] и *rab17* (один из ключевых генов формирования филоподий в меланоцитах и тучных клетках) [26, 29]. Между флангами *mlph* и *prlh* расстояние достаточно небольшое:

у человека – 11252 пар нуклеотидов (п.н.), то есть, они не перекрывают друг друга. Рассмотренные гены генетически сцеплены с геном *mlph* и у птиц [27].

Перечисленные 5 генов образуют единый блок, продукты которого непосредственно участвуют в формировании межклеточного трафика сигнальных молекул в клетках-потомках нервного гребня.

У рассмотренных видов порядок генов отличается: у человека – *cops8, col6a3, mlph, prlh, rab17*; у крупного рогатого скота – *cops8, col6a*3*, mlph, rab17, prlh* (инверсия двух последних генов по отношению к человеку); у домашнего кролика – *rab17, prlh, mlph, col6a3, cops8* (инверсия фланговых генов группы вокруг *mlph*); у домовой мыши – *cops8, rab17, prlh, mlph, col6a3* (похоже на кролика – инверсия одного флангового гена).

Гены, генетически сцепленные с геном миостатина. INPP1 (Inositol Polyphosphate-1-Phosphatase) – проявляется как многофункциональный регулятор, контролирующий ключевые аспекты сигнализации фосфоинозитида, катализируя дефосфорилирование инозитолфосфатов, участвует в метаболизме липидов и глюкозы [30].

HIBCH (3-Hydroxyisobutyryl-CoA Hydrolase) – участвует в контроле активности цикла трикарбоновых кислот, окислительного фосфорилирования [31].

akap19 (A-Kinase Anchoring Protein 9) – белки якоря А-киназы (AKAP) представляют группу структурно разнообразных белков, которые имеют общую функцию связывания с регуляторной субъединицей протеинкиназы А, принадлежит семейству AKAP. Альтернативный сплайсинг этого гена приводит к образованию по крайней мере двух изоформ, локализирующихся в центросоме и аппарате Гольджи и взаимодействуют с многочисленными сигнальными белками, включающими протеинкиназу А типа II, серин / треониновую киназу протеинкиназу N, протеинфосфатазу 1, протеинфосфатазу 2а, протеинкиназу С-эпсилон и фосфодиэстеразу 4D3 [32].

mstn – миостатин, принадлежит к одной из самых больших групп белков, называемых рост трансформирующие факторы (в частности TGF-*β*). *mstn* представляет собой белок, который находится в скелетных мышцах в неактивном состоянии и восстанавливает активность путем связывания с пептидом-предшественником, фоллистатином 3 и связывающим белком TGF-*β*, передавая сигнал через рецепторы. Его рецептор ActRIIB (actin related protein 1B) способен активировать цепь передачи сигнала, ингибирующую дифференцировку и пролиферацию миоцитов. Инактивация *mstn* может влиять на развитие и регенерацию мышц, его делеция у мышей привела к феномену двойной мышечной массы (гиперплазия или гипертрофия) и значительному ее увеличению. Естественные мутации MCTH, имеющие двойной мышечный фенотипический эффект, обнаружены у крупного рогатого скота, собак, овец, свиней и человека [33–40]. *mstn* регулирует эмбриональное развитие и поддерживает гомеостаз у взрослых особей. Когда процесс созревания заканчивается, *mstn* становится отрицательным регулятором роста скелетных мышц. Физиологическая роль миостатина заключается в предотвращении чрезмерного роста мышечной ткани на различных стадиях развития организма.

pms1 (*pms1* Homolog 1, Mismatch Repair System Component) – белок, относящийся к семейству репарации несоответствий ДНК mutL/hexB, один из трех генов, ключевых для расширения триплетных повторов [41].

Эта группа генов вокруг гена *mstn* заметно отличалась по изменчивости порядка у исследованных видов. Так, у человека порядок генов: ген *pms1* (189784450..189877629), *akap19* (A-kinase anchoring protein 19, 11 экзонов, координаты 189879562..190203484) перекрывает ген *mstn* (190055700..190062729), затем следуют *hibch* (190189735..190319826) и *inpp1* (190343589..190371665).

У крупного рогатого скота порядок генов несколько иной: *inpp1* (5934745..5970809), *hibch* (5980871..6136345) перекрывается геном *c2orf88*, его белковый продукт связывается с регуляторной субъединицей протеинкиназы А (6097453..6178350), затем ген *mstn* (6278864..6285491) и ген *pms1* (6460095..6572022).

Порядок генов домашнего кролика следующий: ген *inpp1* (49992159..50023316), ген *hibch* (50040217..50144972), далее *akap*19 (50144159..50301255) частично перекрывает фланги гена *hibch* (на 813 п.н.) и гена *mstn* (50301113..50306022) на 142 п.н., затем локализован ген *pms1* (50479332..50597597) (рис. 1).

Наибольшее сходство в порядке генов обнаружено у крупного рогатого скота и домашнего кролика, но между домашним кроликом и человеком есть частичное и полное перекрытие гена *mstn* геном *akap19*, в отличие от крупного рогатого скота и домовой мыши.

Гены, генетически сцепленные с геном рецептора лептина (lepr). *dnajc6* (DnaJ Heat Shock Protein Family (Hsp40) Member C6; Auxilin) принадлежит к эволюционно консервативному семейству белков DNAJ/HSP40, регулирующих активность молекулярных шаперонов путем стимуляции активности АТФазы. Взаимодействуя с Hcs70, *dnajc6* способствует разрушению клатрина (ключевого белка формирования везикул). Снижение активности *dnajc6* приводит к нарушению рециркуляции синаптических везикул и нарушению эндоцитоза, опосредованного клатрином [42].

lepr (Leptin Receptor) – рецептор лептина (системного регулятора), лептин вовлечен в особенности роста и липидного обмена, который через *lepr* взаимодействует с различными путями передачи сигнала, такими как JAK-STAT3, PI3K/Akt, MAPK и др. [43, 44].

leprot (Leptin Receptor Overlapping Transcript) – транскрипт перекрывается с геном *lepr*, продукт *leprot* участвует в созревании *lepr* и рецептора соматотропного гормона, а также включен в передачу рецепторов самого лептина и соматотропного гормона к плазматической мембране [45].

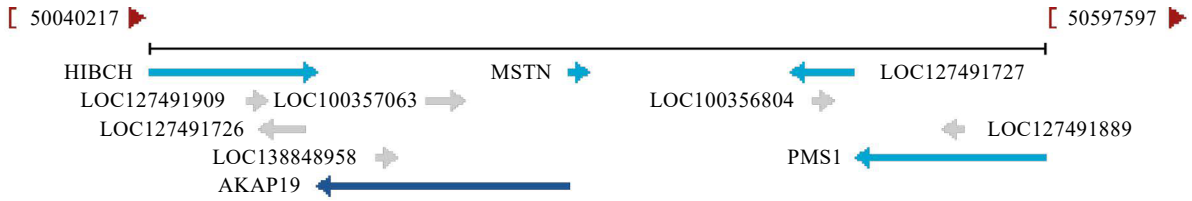


Рисунок 1. Порядок расположения и взаимной ориентации генов, фланкирующих локус миостатина кролика (*mstn Oryctolagus cuniculus*)

Figure 1. Order and relative orientation of genes flanking myostatin locus in *mstn Oryctolagus cuniculus*

pde4b (Phosphodiesterase 4B) – член семейства фосфодиэстераз типа IV, специфичного для циклического АМФ, регулирует клеточные концентрации циклических нуклеотидов и таким образом играет роль в передаче сигнала [46].

sgip1 (SH3GL Interacting Endocytic Adaptor 1) – функционирует в везикулярном обмене, опосредованном клатрином. Имеет как мембран-связывающую / тубулизирующую активность, так и способность привлекать белки, необходимые для формирования функциональных ямок, покрытых клатрином. Предпочтительно связывается с мембранами, обогащенными фосфатидилсерином и фосфоинозитидами [47].

Все 5 генов участвуют в сигнальной системе в основном за счет регуляции внутриклеточного транспорта сигнальных молекул.

Порядок генов у домашнего кролика и крупного рогатого скота был одинаковым (*sgip1, pde4b, lepr, leprot, dnajc6*), у человека обнаруживалась инверсия этого порядка – *dnajc6, lepr, leprot, pde4b, sgip1*, что очень схоже с последовательностью генов у домашней мыши – *dnajc6, leprot, lepr, pde4b, sgip1*.

Гены, генетически сцепленные и локализованные в хромосоме X. *atrx* (ATRX chromatin remodeler) белок содержит домен АТФазы / хеликазы и, соответственно, принадлежит к семейству белков ремоделирования хроматина SWI/SNF. Этот белок подвергается фосфорилированию, зависящему от клеточного цикла, который регулирует его ассоциацию с ядерным матриксом и хроматином и предполагает его участие в регуляции генов в интерфазе и хромосомной сегрегации в митозе. Мутации в гене *atrx* связаны с Х-сцепленными синдромами, проявляющимися когнитивными нарушениями, а также с синдромом альфа-талассемии (*atrx*). Эти мутации вызывают разнообразные изменения в паттерне метилирования ДНК, что может обеспечить связь между ремоделированием хроматина, метилированием ДНК и экспрессией генов в процессах развития [48].

fgf16 (fibroblast growth factor 16) – член семейства белков, участвующих в различных биологических процессах, включая эмбриональное развитие, рост клеток, морфогенез, восстановление тканей, рост опухолей и инвазии клеток [49].

magt1 (magnesium transporter 1) – белок-транспортер катионов магния, который локализуется в клеточной мембране. Этот белок также ассоциируется с N-олигосахарилтрансферазой и, следовательно, может играть роль в N-гликозилировании [50].

cox7b (cytochrome c oxidase subunit 7B) – конечный компонент митохондриальной дыхательной цепи, катализирует перенос электронов от восстановленного цитохрома С к кислороду. Цитохром С оксидаза – гетеромерный комплекс, состоящий из 3 каталитических субъединиц, кодируемых митохондриальными генами, а также несколько структурных субъединиц, кодируемых ядерными генами. Митохондриальные субъединицы участвуют в переносе электронов, тогда как ядерные субъединицы могут играть роль в регуляции и сборке всего комплекса. Ядерный ген кодирует субъединицу VIIb, очень похожую на белок бычьего COX VIIb, и обнаруживается во всех тканях [51].

atp7a (ATPase copper transporting alpha) – трансмембранный белок, обеспечивающий транспорт меди через мембраны. Этот белок локализуется в транссети Гольджи, поставляя медь ферментам, зависящим от меди в секреторном пути, функционирует как в транспорте, так и в выведении меди из клеток [52].

pgam4 (phosphoglycerate mutase family member 4) – предполагается, что ген возник в результате ретротранспозиции, известен как экспрессируемый ген, кодирующий белок. Кодируемый белок является членом семейства фосфоглицератмутаз, группы ферментов, катализирующих перенос фосфатной группы из 3-фосфоглицерата в 2-фосфоглицерат [53]. Этот ген не локализован в хромосоме Х у крупного рогатого скота и у домашнего кролика. Группа из 5 генов включает белок *atrx*, участвующий в переупаковке хроматина; 2 гена, отвечающих за транспорт магния и меди; гена, кодирующего субъединицу цитохрома С, участвующую в энергообеспечении и антиоксидантной защите клетки; а также ген *fgf16* из семейства факров роста фибробластов, который регулирует скорость клеточного деления. То есть, группа этих генов вовлечена в фундаментальные биохимические процессы жизнеобеспечения клетки и смены программ генной экспрессии. В этом случае генетическое сцепление между этими генами одинаково у крупного рогатого скота и домашнего

кролика (*atp7a, cox7b, magt1, atrx, fgf16*), у домовой мыши несколько другой порядок генов (*fgf16, atrx, magt1, cox7b, atp7a*), у человека порядок генов ближе к домовой мыши (*atrx, fgf16, magt1, cox7b, atp7a*).

Гены, входящие в эволюционно консервативную петлю хроматина – auts2, galnt17, caln1. Наиболее подробно изученная и консервативная у разных отрядов млекопитающих хроматиновая петля включает 3 гена, кодирующих следующие белки: *auts2* (Activator Of Transcription And Developmental Regulator *auts2*) – фактор регуляции транскрипции, *galnt17* (Polypeptide N-Acetylgalactosaminyltransferase1) – фермент гликозилирования белков, *caln1* (Calneuron 1) – кальций связывающий белок.

Ген *auts2* в ядрах клеток действует как ключевой регулятор транскрипции в нейроразвитии, тогда как в цитоплазме он участвует в церебральном кортикогенезе, включая миграцию нейронов и нейритогенез, посредством контроля перестроек цитоскелета; вовлечен в нейроразвитие и рассматривается как ген-кандидат для многочисленных неврологических расстройств, включая расстройства аутистического спектра, умственную отсталость и задержку развития [54, 55].

По данным Raman *et al.* [56] *galnt17* (N-ацетилгалактозаминилтрансфераза 17) вовлечен в гликозилирование белков при участии двух других трансфераз. Данный ген предположительно выполняет роль шаперона [20].

Изменения гликозилирования связаны с различными неврологическими расстройствами, включая болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона, расстройства аутистического спектра и шизофрению. О-гликозилирование муцинового типа модулирует секрецию и связывание с мембраной белков во всем организме и участвует в различных функциях, таких как межклеточные коммуникации, клеточная адгезия, взаимодействие хозяина с патогеном и иммунные реакции [57].

caln1 – белок, обладающий высоким сходством с кальций-связывающими белками семейства кальмодулинов, участвует в физиологии нейронов и потенциально важен для запоминания и обучения [58].

По данным ряда исследований, эти 3 гена имеют некоторые общие характеристики регуляции [20, 55, 58]. У пациентов с расстройствами аутистического спектра и синдромом гиперсоциальности наблюдаются сходные нейропатологические фенотипы в мозжечке и гиппокампе, обнаруживаются изменения размеров червя мозжечка, который, предположительно, участвует в социальном взаимодействии, а также в гиппокампе, где выявлена аномальная синаптическая активность [59–61]. Перекрывающиеся патологии указывают на важность этих двух областей мозга в общих фенотипах аутизма, гиперсоциальности и дополнительно подтверждают возможную функциональную связь между соседними генами *auts2, galnt17, caln1.*

Взаимосвязь между 3 генами, вхождение их в одну общую эволюционно консервативную хроматиновую петлю, имеющую некоторые общие черты совместной регуляции, свидетельствует об определенной вероятности негативных последствий индивидуального редактирования каждого из них.

В результате анализа выделены 5 групп генов, внутри каждой обнаруживалось не только генетическое сцепление, но и определенные функциональные связи: 2 группы связаны с сигнальными системами, продукты сцепленных с *mlph* генов участвуют в контроле межклеточного, а с *lepr* – внутриклеточного трафиков сигнальных молекул; третья локализована в хромосоме X и вовлечена в фундаментальные процессы жизнеобеспечения клетки, связанные с ремоделированием хроматина (ген *atrx*); четвертая расположена в эволюционно консервативной хроматиновой петле и включает 3 гена, их экспрессия связана с развитием и функциями головного мозга. Пятая группа, генетически сцепленная с геном *mstn*, отличается от остальных тем, что экспрессия *mstn* тканеспецифична, в частности, у человека последовательность этого гена пересекается с последовательностью гена *akap9*, продукт которого связывает центросому с аппаратом Гольджи и с элементами цитоскелета.

На следующем этапе выполнялся анализ распределения различных повторов по этим группам генов.

Распределение повторов в 5 функционально разных группах генов у человека, крупного рогатого скота, домашнего кролика. С помощью программы RepeatMasker Института системной биологии (США, https://repeatmasker.org/cgi-bin/AnnotationRequest) рассчитано количество неавтономных коротких диспергированных повторов SINE (short interspersed nuclear elements), автономных длинных диспергированных повторов LINE (long interspersed nuclear elements), эндогенных ретровирусов с длинными терминальными повторами (long terminal repeats – LTR, endogenous retroviruses – ERV), ДНК транспозоны (далее обозначенные как DNA) и микросателлиты (STR – short tandem repeats) – тандемные повторы с длиной элементарной единицы повтора в пределах от 1 до 6 пар нуклеотидов (п.н.). Повторы рассчитывались для каждого гена отдельно: для человека с использованием версии *Homo sapiens* – RepeatMasker Version 406; для крупного рогатого скота – *Bos taurus* – RepeatMasker Version 405; для домашнего кролика *Oryctolagus cuniculus* – RepeatMasker Version: 405; для домовой мыши – *Mus musculus* – RepeatMasker Version: 405.

Так как SINE и LINE представляют группы повторов, появившиеся в эволюции в разное время, они были подразделены в соответствии с разным эволюционным возрастом. Среди SINE отдельно выделены наиболее древние – SINE/MIR, среди LINE – LINE/L2 и отдельно подсчитаны в каждом из рассмотренных генов [62, 63]. Полученные данные представлены в таблицах 1–4.

Таблица 1. Количество повторов в генах домовой мыши и генетически сцепленных с ними соседних генах

Table 1. Repeats in *Mus musculus* genes and genetically linked neighboring genes

Ген, количество экзонов	Координаты генов (длины генов, п.н.)	SINE/ tRNA-C	SINE/ MIR	LINE/L1	LINE/L2	LTR	DNA	STR
Хромосома 1 (меланофилин, *mlph*; миостатин, *mstn*)								
cops8, 9	90531147..90541063 (9916)	5	0	2	0	7	0	7
rab17, 7	90885855..90897395 (11540)	2	0	1	0	14	1	12
prlh, 3	90879545..90881848 (2303)	0	0	1	0	1	0	0
mlph, 16	90842750..90878864 (36114)	15	2	4	0	26	2	13
col6a3, 44	90694582..90771710 (77128)	37	5	19	4	37	5	59
inpp1, 8	52824584..52856847 (32263)	19	0	11	0	17	5	28
hibch, 14	52884197..52960145 (75948)	22	3	34	0	27	5	31
c2orf88, 10	52961483..53031816 (70333)	16	3	26	1	30	3	24
mstn, 3	53100799..53107238 (6439)	2	0	4	0	9	0	3
1700019a02, 10	53197732..53226923 (29191)	9	1	11	0	2	2	10
pms1, 16	53225794..53336190 (110396)	50	4	43	4	46	5	39
Хромосома 4 (рецептор лептина, *lepr*)								
dnajc6, 23	101353751..101499996 (146245)	210	7	25	3	61	14	112
leprot, 5	101504922..101516561 (11639)	16	0	3	2	1	0	9
lepr, 21	101574393..101676375 (101982)	61	9	24	6	38	10	62
pramel17, 4	101692166..101701219 (9053)	7	0	4	0	3	0	10
pde4b, 26	101944529..102464459 (519930)	193	36	184	34	204	41	291
sgip1, 29	102616351..102834623 (218272)	66	26	68	7	56	16	114
Хромосома X (*atrx*)								
fgf16, 3	104808083..104820138 (12055)	2	0	3	0	9	0	7
atrx, 35	104841221..104972978 (131757)	22	4	101	3	56	8	45
magt1, 11	105011690..105055408 (43718)	24	0	50	0	9	0	21
cox7b, 3	105059306..105066056 (6750)	1	0	0	1	8	0	0
atp7a, 23	105070830..105171766 (100936)	65	2	99	1	46	4	35
Хромосома 5 (*auts2, galnt17, caln1*)								
auts2, 19	105070830..105171766 (100936)	24	0	49	0	33	1	40
galnt17, 12	130903181..131336360 (433179)	501	7	64	4	320	47	372
caln1, 15	130398245..130876253 (478008)	594	12	98	11	327	37	466

Таблица 2. Количество повторов в генах человека и генетически сцепленных с ними соседних генах

Table 2. Repeats in *Homo sapiens* genes and genetically linked neighboring genes

Ген, количество экзонов	Координаты генов (длины генов, п.н.)	SINE/Alu, tRNA-C	SINE/ MIR	LINE/L1	LINE/L2	LTR	DNA	STR
Хромосома 2 (меланофилин, *mlph*; миостатин, *mstn*)								
cops8, 9	237085889..237100474 (14585)	2	3	5	2	0	2	4
col6a3, 44	237324018..237414164 (90146)	16	14	11	9	9	16	15
mlph, 20	237486410..237555322 (68912)	17	12	6	9	19	17	16
prlh, 2	237566574..237567175 (601)	0	0	0	0	0	0	0
rab17, 6	237574326..237590734 (16408)	6	1	4	3	2	2	6
inpp1, 8	190343589..190371665 (28076)	15	7	8	4	1	9	9
hibch, 17	190189735..190319826 (130091)	48	15	71	25	47	25	19
akap19, 11	189879562..190203484 (323922)	104	46	157	45	88	73	54
mstn, 3	190055700..190062729 (7029)	0	0	1	1	0	1	2
pms1, 16	189784450..189877629 (93179)	45	25	34	25	13	23	22
Хромосома 1 (рецептор лептина, *lepr*)								
dnajc6, 21	65264749..65415871 (151122)	56	73	53	38	28	41	35
lepr, 20	65420652..65641559 (220907)	52	38	87	76	43	36	53
leprot, 6	65420668..65436007 (15339)	4	4	3	9	2	3	4
pde4b, 25	65792510..66374579 (582069)	103	208	165	186	114	100	129
sgip1, 29	66533361..66751139 (217778)	38	93	41	62	21	60	68
Хромосома X (*atrx*)								
atrx, 35	77504880..77786216 (281336)	180	24	220	19	10	38	58
fgf16, 3	77447389..77457278 (9889)	3	1	3	0	0	1	4
magt1, 10	77825747..77895568 (69821)	103	6	37	6	7	14	13
cox7b, 3	77899468..77907376 (7908)	11	1	3	1	0	1	3
atp7a, 23	77910693..78050395 (139702)	103	20	100	28	17	27	35
pgam4, 1	77967949..77969638 (1689)	0	0	0	0	0	0	0
Хромосома 7 (*auts2, galnt17, caln1*)								
auts2, 25	69598475..70793506 (1195031) SINE/5S-Deu-L2	491	303	302	213	99	230	336
galnt17, 14	71132144..71713599 (581455) SINE/5S-Deu-L2	497	95	226	90	240	152	161
caln1, 17	71779491..72504279 (724788)	668	98	405	97	259	124	205

Таблица 3. Количество повторов в генах крупного рогатого скота и генетически сцепленных с ними соседних генов

Table 3. Repeats in *Bos taurus* genes and genetically linked neighboring genes

Ген, количество экзонов	Координаты генов (длины генов, п.н.)	SINE/ tRNA-C	SINE/ MIR	LINE/L1	LINE/L2	LTR	DNA	STR
Хромосома 3 (меланофилин, *mlph*)								
cops8, 9	16552279..116565322 (13043)	5	1	4	3	2	0	0
col6a3, 45	116781707..116872733 (91026)	77	16	65	13	11	15	13
mlph, 17	116959511..117005443 (45932)	39	7	25	15	5	10	8
rab17, 9	117010781..117057337 (46556)	24	5	44	4	6	5	12
prlh, 2	117013542..117014310 (768)	1	0	1	0	0	0	0
Хромосома 2 (миостатин, *mstn*)								
inpp1, 9	5934745..5970809 (36064)	30	3	19	2	22	6	5
hibch, 18	5980871..6136345 (155474)	101	28	88	22	27	18	21
c2orf88, 7	6097453..6178350 (80897)	65	14	38	10	9	18	15
mstn, 3	6278864..6285491 (6627)	6	2	1	5	1	0	1
pms1, 14	6460095..6572022 (111927)	71	16	74	18	18	18	19
Хромосома 3 (рецептор лептина, *lepr*)								
sgip1, 25	78572342..78813741 (241399)	130	13	110	30	54	13	30
pde4b, 16	78957188..79406811 (449623)	294	93	254	81	85	41	93
lepr, 21	79733479..79837823 (104344)	49	22	24	32	16	21	22
leprot, 5	79914158..79927997 (13839)	12	1	2	0	4	1	3
dnajc6, 21	79928527..80107442 (178915)	111	33	103	48	34	34	31
Хромосома X (*atrx*)								
atp7a, 23	74360086..74490931 (130845)	61	25	48	16	38	32	17
cox7b, 3	74502510..74507315 (4805)	3	1	9	0	0	3	0
magt1, 10	74517592..74566517 (48925)	26	7	29	7	15	12	8
atrx, 38	74597136..74883173 (286037)	133	64	98	59	91	83	51
fgf16, 3	74909582..74917602 (8020)	5	0	6	0	3	1	2
Хромосома 25 (*auts2, galnt17, caln1*)								
auts2, 22	29782249..30997929 (1215680) SINE/5s-deu-l2	874	168	930	159	292	207	197
galnt17, 11	29133705..29563785 (430080)	304	45	174	56	79	35	59
caln1, 8	28636197..29098356 (462159)	326	172	151	127	86	58	94

Таблица 4. Количество повторов в генах домашнего кролика и генетически сцепленных с ними соседних генов

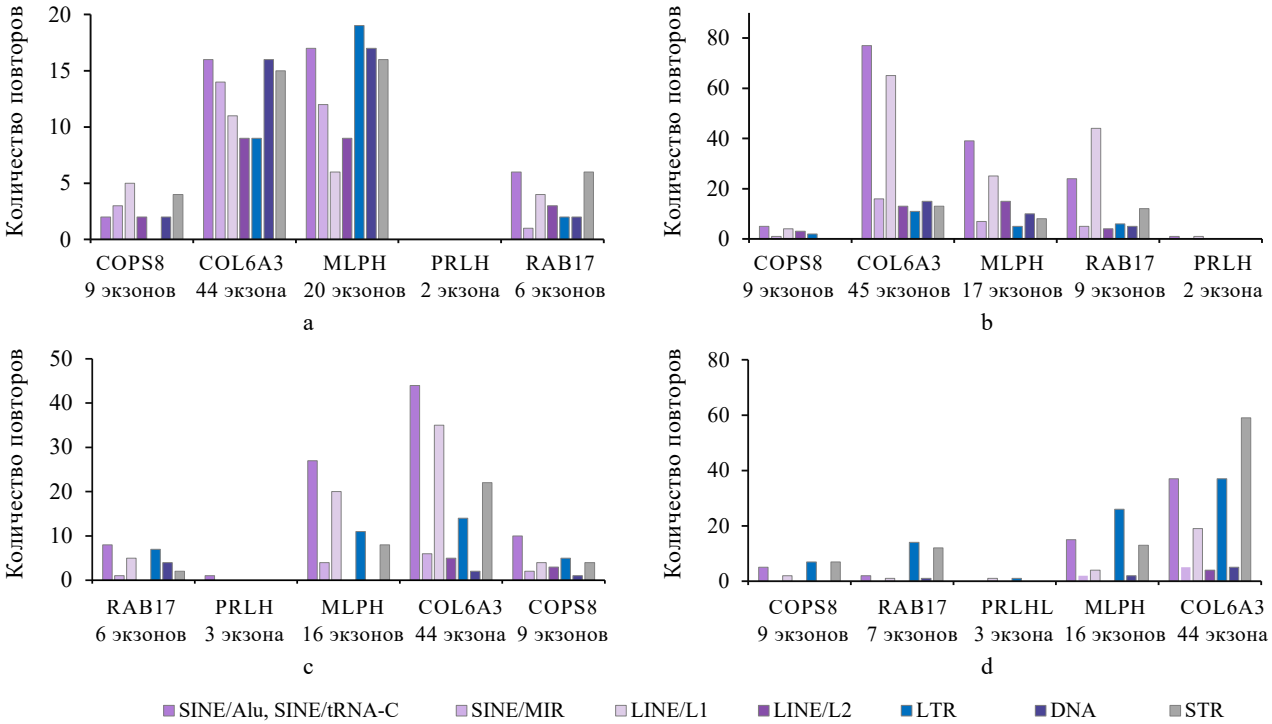
Table 4. Repeats in *Oryctolagus cuniculus* genes and genetically linked neighboring genes

Ген, количество экзонов	Координаты генов (длины генов, п.н.)	SINE/ tRNA-C	SINE/ MIR	LINE/L1	LINE/L2	LTR	DNA	STR
Хромосома 3 (меланофилин, *mlph*; миостатин, *mstn*)								
rab17, 6	2670146..2689117 (18971)	8	1	5	0	7	4	2
prlh, 3	2695431..2697452 (2021)	1	0	0	0	0	0	0
mlph, 16	2702392..2739474 (37082)	27	4	20	0	11	0	8
col6a3, 44	2798731..2886904 (88173)	44	6	35	5	14	2	22
cops8, 9	3070980..3085566 (14586)	10	2	4	3	5	1	4
inpp1, 6	49992159..50023316 (31157)	15	5	14	2	7	2	6
hibch, 14	50040217..50144972 (104755)	38	35	19	16	18	26	19
akap19, 11	50144159..50301255 (157096)	52	52	14	21	11	23	31
mstn, 3	50301113..50306022 (4909)	2	2	1	0	0	3	1
pms1, 15	50479332..50597597 (118265)	47	48	11	15	25	20	41
Хромосома 7 (рецептор лептина, *lepr*)								
sgip1, 28	105791617..106037962 (246345)	163	17	89	15	27	12	60
pde4b, 23	106187518..106866237 (678719)	360	53	309	40	86	53	192
lepr, 27	106975163..107188868 (213705)	132	20	60	29	45	11	60
leprot, 5	107233696..107246483 (12787)	8	1	4	5	1	0	5
dnajc6, 24	107253345..107446470 (193125)	96	38	48	20	23	20	44
Хромосома X (*atrx*)								
atp7a, 24	72031750..72150819 (119069)	74	18	82	2	14	6	29
cox7b, 3	72158789..72164232 (5443)	8	0	4	0	0	1	4
magt1, 10	72168314..72217797 (49483)	41	3	32	4	2	1	11
atrx, 41	72240268..72441558 (201290)	142	27	99	15	28	26	52
fgf16, 3	72470347..72480290 (9943)	11	0	10	1	0	1	0
Хромосома 19 (*auts2, galnt17, caln1*)								
auts2, 22	46673940..47923677 (1249737)	1029	102	536	121	188	104	368
galnt17, 11	45944221..46449301 (505080)	465	80	111	39	46	56	172
caln1, 9	45276311..45889283 (612972)	583	123	80	49	31	42	196

Для упрощения сравнений встречаемости различных типов повторов полученные данные представлены по разным группам генов на рисунках 2–6. На рисунке 2 представлено сравнение частоты повторов в группе генов, фланкирующих ген *mlph* у человека, крупного рогатого скота, домашнего кролика, домовой мыши.

Распределение повторов у разных видов относительно сходное: наименьшее количество у человека, наибольшее – у крупного рогатого скота; у каждого вида наименьшее количество повторов обнаруживается в генах *prlh* и *cops8*, наибольшее – в генах *col6a3* (самый длинный ген в этой группе с наибольшим количеством экзонов: человек – 90146, крупный рогатый скот – 91026, кролик – 88173, мышь – 77128 п.н.), *mlph* и *rab17*. У крупного рогатого скота, домашнего кролика и особенно домовой мыши в большинстве случаев в генах преобладают «молодые» повторы SINE/tRNA-C и LINE/L1. У человека они менее выражены еще и в связи с общим низким количеством повторов по сравнению с другими видами. Особенность повторов в этой группе – высокая частота встречаемости STR у домовой мыши по сравнению с другими видами.

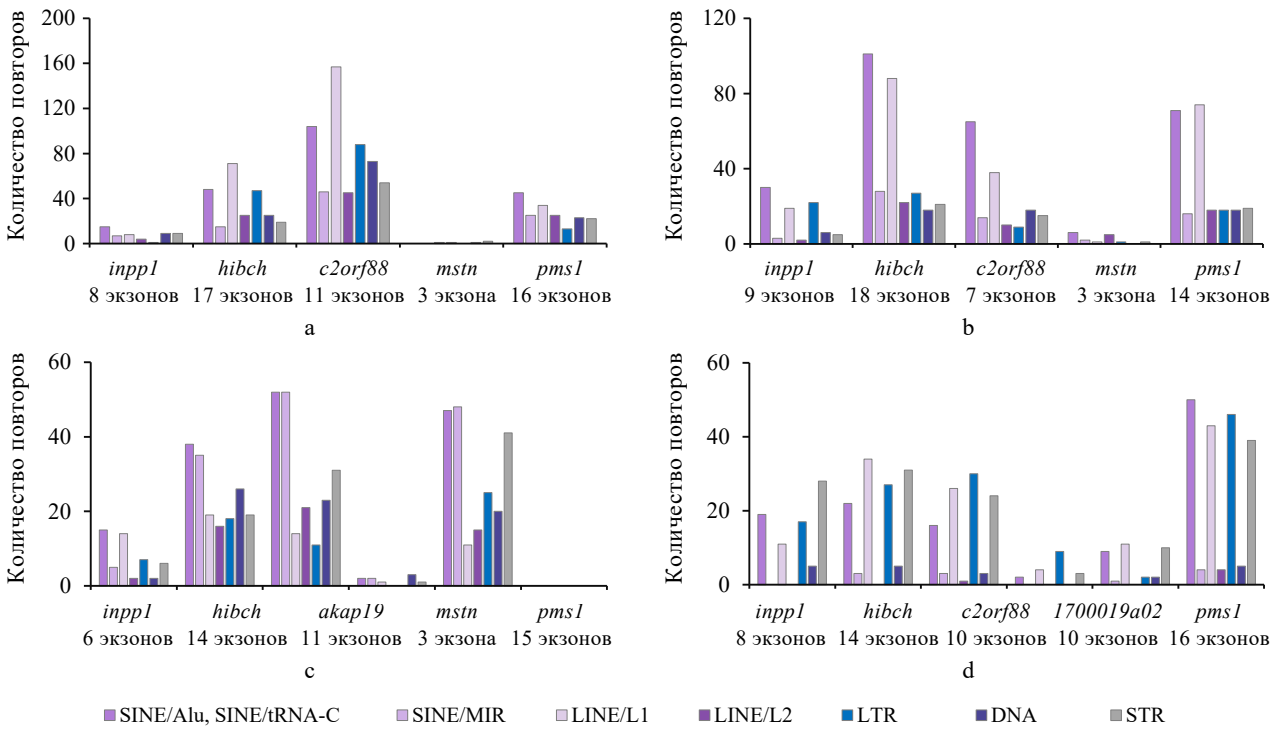
Среди группы генов, генетически сцепленных с *mstn*, обнаруживается другое распределение повторов (рис. 3). Их наименьшее количество у всех видов выявлено в генах *mstn* и *inpp1*, близкие значения наблюдались у человека и домашнего кролика по генам *hibch* и *pms1*, но их оказалось значительно меньше, чем у крупного рогатого скота. У крупного рогатого скота и кролика оказались близкие значения по количеству повторов в генах с*2orf88* у крупного рогатого скота (белок – малая мембранная АКАР) и *akap19* у домашнего кролика, существенно меньше, чем у человека по гену *akap19* (рис. 3). Самые выраженные межвидовые отличия наблюдались по соотношениям «молодых» и «старых» повторов SINE и LINE соответственно: в генах *hibch*, *akap19* человека, а также *hibch*, *c2orf88* (ортолог *akap19*) у домовой мыши доминирует «молодой» повтор LINE/L1; у крупного рогатого скота в генах *hibch* и *c2orf88* – «молодой» неавтономный повтор SINE/tRNA-C; у кролика в генах *hibch*, *akap19* и *pms1* «молодые» и «древние» SINE и LINE почти равны по своей представленности в генах *akap19* и *pms1*, причем в последнем гене «старых» LINE/L2 даже больше,



«Молодые» повторы – SINE/Alu, SINE/tRNA-C у человека, SINE/tRNA-C у крупного скота, домашнего кролика, домовой мыши; LINE/L1 у всех видов; «древние» повторы – SINE/MIR, LINE/L2 и эндогенные ретровирусы (LTR), ДНК транспозонов (DNA), микросателлиты (STR) в генах *cops8* (формирование экзосом), *col6a3* (связь с внеклеточным матриксом), *mlph* (транспорт к концам дендритов в клетках, потомков нервного гребня), *prlh* (элемент межнейронной сигнальной системы), *rab17* (формирование филоподий)

Рисунок 2. Количество разных повторов в 5 генетически тесно сцепленных генах, вовлеченных в межклеточный трафик сигнальных молекул у (a) человека, (b) крупного рогатого скота, (c) домашнего кролика, (d) домовой мыши

Figure 2. Different repeats in 5 genetically closely linked genes involved in intercellular trafficking of signaling molecules in (a) *Homo sapiens*, (b) *Bos taurus*, (c) *Oryctolagus cuniculus*, and (d) *Mus musculus*



«Молодые» повторы – SINE/Alu, SINE/tRNA-C у человека, SINE/tRNA-C у крупного скота, домашнего кролика, домовой мыши; LINE/L1 у всех видов; «древние» повторы – SINE/MIR, LINE/L2 и эндогенные ретровирусы (LTR), ДНК транспозонов (DNA), микросателлиты (STR) в генах *inpp1* (метаболизм липидов и глюкозы), *hibch* (контроль активности цикла трикарбоновых кислот, окислительного фосфорилирования), *akap19* (белки якоря А-киназы) связываются с центросомой и аппаратом Гольджи; у крупного рогатого скота и домовой мыши заменен на ортолог *c2orf88* (белок малая мембранная АКАР), *mstn* (блокирует увеличение диаметра мышечного волокна), *pms1* (репарация несоответствий ДНК)

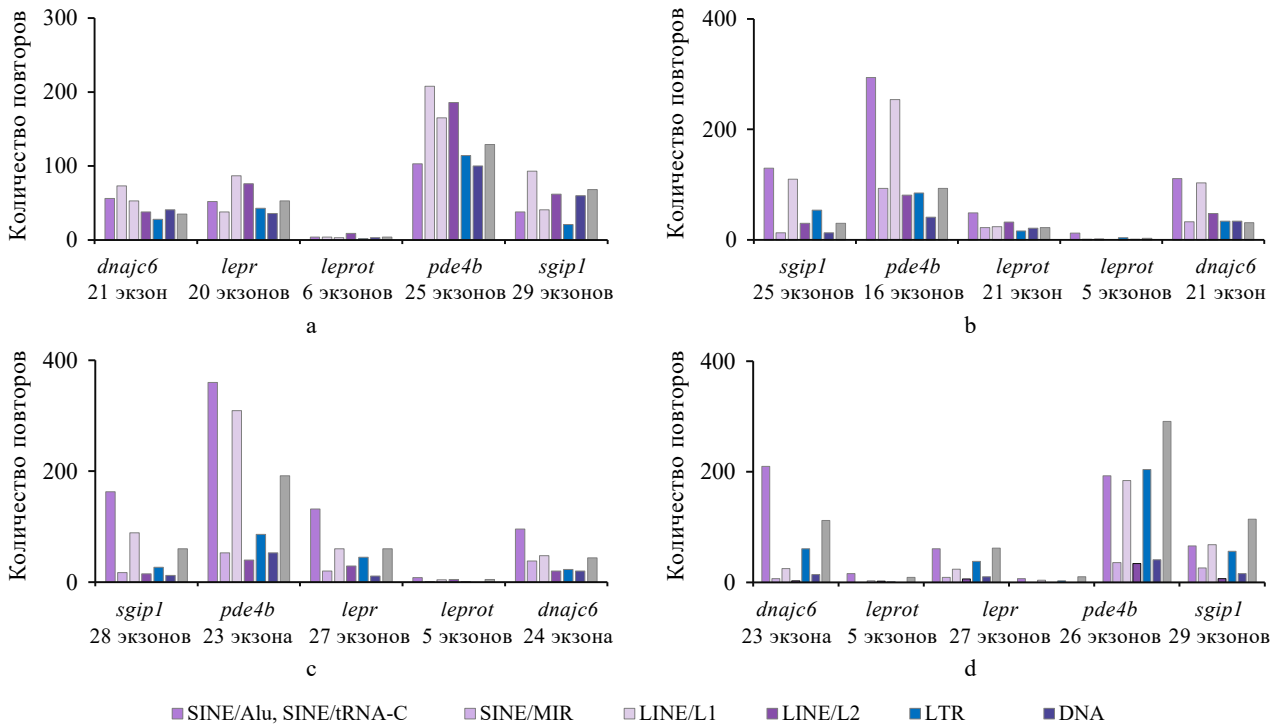
Рисунок 3. Количество разных повторов в 4 генетически сцепленных с миостатином (*mstn*) генах у человека (a), крупного рогатого скота (b), домашнего кролика (c), домовой мыши (d)

Figure 3. Different repeats in 4 myostatin-linked (mstn) genes in *Homo sapiens* (a), *Bos taurus* (b), *Oryctolagus cuniculus* (c), and *Mus musculus* (d)

чем LINE/L1. Такой относительно повышенный консерватизм домашнего кролика по представленности древних повторов, предположительно, обусловлен сложными перестройками и структурными взаимоотношениями гена *mstn* с соседними генами (рис. 1).

На рисунке 4 представлены данные о частоте разных повторов в генах, тесно сцепленных с геном рецептора лептина (*lepr*). Относительно меньшее количество повторов обнаружилось в генах человека по сравнению с крупным рогатым скотом, домашним кроликом и домовой мышью; наименьшее – в *leprot*, который перекрывается геном *lepr*. В этой группе генов, так же как и в случае группы, генетически сцепленной с *mstn* (рис. 3), наибольшие межвидовые отличия наблюдались в соотношении «молодых» и «древних» SINE и LINE соответственно, но доминирование «древних» повторов выявлено у человека. У крупного рогатого скота, домашнего кролика и домовой мыши преобладают «молодые» SINE/tRNA-C и LINE/L1 повторы соответственно (рис. 4). Особенностью распределения повторов у домовой мыши является высокая частота встречаемости STR.

Гены, генетически сцепленные с ремоделингом хроматина (*atrx*), характеризуются относительно небольшим количеством повторов: наименьшим – гены *fgf16* (фактор роста фибробластов 16) и *cox7b* (субъединица цитохрома С); наибольшим – ген *atp7a* (транспортер меди), затем – *magt1* (транспортер катионов магния). В данном случае обогащенность повторами у человека выше, чем у крупного рогатого скота и домашнего кролика; у всех видов доминирует присутствие «молодых» повторов SINE, за исключением гена *atrx* у человека и гена *atp7a* у кролика, в которых преобладают «молодые» LINE/L1 (рис. 5). Группа генов домовой мыши существенно отличается от генов других видов (за исключением генов *atrx* у человека и *atp7a* у кролика) почти полным отсутствием «старых» повторов (SINE/MIR, LINE/L2) и тем, что в них преобладает представленность «молодых» повторов LINE/L1 по сравнению с SINE/tRNA-C. То есть, повышенная частота встречаемости LINE/L1 в хромосоме X, связанная с ее вовлеченностью в инактивацию одной из хромосом X у млекопитающих, имеет видо- и локус-специфичность [8].



«Молодые» повторы – SINE/Alu, SINE/tRNA-C у человека, SINE/tRNA-C у крупного скота, домашнего кролика, домовой мыши; LINE/L1 у всех видов, «древние» повторы – SINE/MIR, LINE/L2 и эндогенные ретровирусы (LTR), ДНК транспозонов (DNA), микросателлиты (STR) в генах *dnajc6* (везикулярный обмен), *lepr* (рецептор лептина), *leprot* (созревание и транспорт рецепторов лептина, соматотропного гормона к плазматической мембране), pde4b (регуляция цАМФ – внутриклеточной сигнальной системы), *sgip1* – (везикулярный обмен)

Рисунок 4. Количество разных повторов в 5 генетически тесно сцепленных генах, вовлеченных во внутриклеточный трафик сигнальных молекул генов человека (a), крупного рогатого скота (b), домашнего кролика (c), домовой мыши (d)

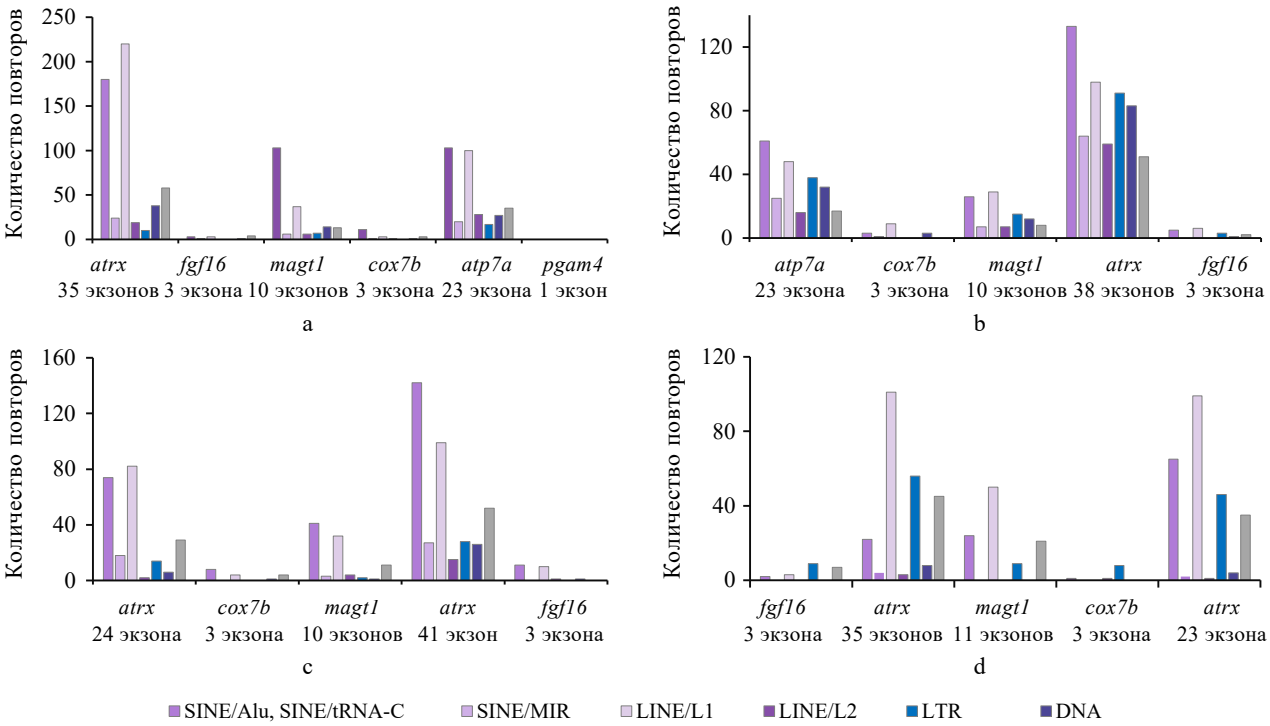
Figure 4. Different repeats in 5 genetically closely linked genes involved in intracellular trafficking of signaling molecules in genes of (a) *Homo sapiens*, *Bos taurus* (b), *Oryctolagus cuniculus* (c), and *Mus musculus* (d)

Гены *auts2* (фактор регуляции транскрипции), *galnt17* (фермент гликозилирования белков), *caln1* (транспортер кальция) формируют хроматиновую петлю, функционирующую как модуль с общей регуляцией, когда экспрессия одного гена зависит от экспрессии другого и подавление транскрипции одного приводит к увеличению транскрипции другого [58]. Они оказались среди самых длинных во всей выборке рассмотренных генов, особенно ген *auts2* (у человека – 1195031, крупного рогатого скота – 1215680, домашнего кролика – 1249737, домовой мыши – 100936 п.н.). Длины гена *galnt17* соответственно – 581455, 430080, 505080, 433179 п.н.; гена *caln1* – 724788, 462159, 612972, 478008 п.н. (табл. 1–4).

Количество разных повторов представлено на рисунке 6. У всех видов по всем 3 генам доминирует количество «молодых» неавтономных повторов SINE, за исключением гена *auts2* у крупного рогатого скота, в котором «молодых» повторов LINE/L1 несколько больше, чем SINE/tRNA-C (рис. 6). У человека заметно меньше повторов по гену *auts2*, чем у крупного рогатого скота и домашнего кролика, и больше – по генам *galnt17* и *caln1*. У домовой мыши и в этой группе генов обнаруживается повышенная частота встречаемости STR по сравнению с другими видами.

Полученные данные позволяют рассмотреть несколько следующих потенциальных зависимостей частоты встречаемости разных транспозонов от особенностей локализации генов, в частности, от принадлежности к одной и той же аутосоме.

Гены *mlph* и *mstn* принадлежат к одной и той же аутосоме: у человека – аутосоме 2, у кролика – 3, у домовой мыши – 1, у крупного рогатого скота – к разным хромосомам. Однако оба гена по распределению разных транспозонов (рис. 2, 3) имеют выраженные видоспецифичные особенности, особенно домашний кролик по соотношению «молодых» и «древних» повторов у генов, генетически сцепленных с *mstn*, по SINE и LINE (рис. 3). У человека в большинстве случаев по этим генам наблюдается относительно пониженное количество разных транспозонов по сравнению с другими видами.



«Молодые» повторы – SINE/Alu, SINE/tRNA-C у человека, SINE/tRNA-C у крупного скота, домашнего кролика, домовой мыши; LINE/L1 у всех видов; «древние» повторы – SINE/MIR, LINE/L2 и эндогенные ретровирусы (LTR), ДНК транспозонов (DNA), микросателлиты (STR) в генах *atrx* (ремоделирование хроматина), *fgf16* (фактор роста фибробластов 16), *magt1* (транспортер катионов магния), *cox7b* (субъединица цитохрома С), *atp7a* (транспортер меди)

Рисунок 5. Количество разных повторов в 5 генетически тесно сцепленных генах (хромосома X) с геном ремоделинга хроматина (*atrx*) у генов человека (a), крупного рогатого скота (b), домашнего кролика (c), домовой мыши (d)

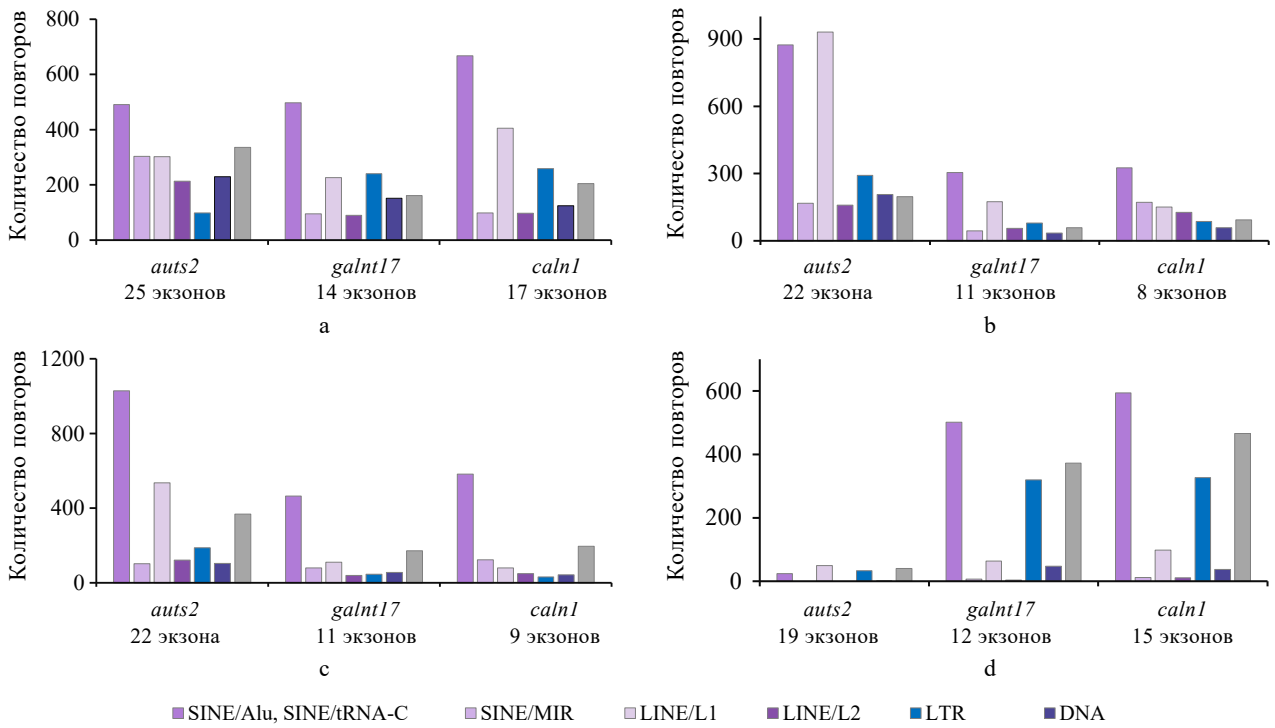
Figure 5. Different repeats in 5 genetically closely linked genes (chromosome X) with the chromatin remodeling gene (*atrx)* in genes of *Homo sapiens* (a), *Bos taurus* (b), *Oryctolagus cuniculus* (c), and *Mus musculus* (d)

Рассчитанные коэффициенты корреляции Спирмена между частотами встречаемости различных транспозонов показывают статистически достоверную положительную связь ($p < 0{,}05$) между некоторыми из них. Эта связь в первую очередь зависит от анализируемого гена (табл. 5, 6) у человека и крупного рогатого скота, тогда как у домашнего кролика и домовой мыши она отсутствует, например, для генов, генетически сцепленных с *mstn* (табл. 6). Статистически достоверных корреляций между количеством разных повторов заметно меньше у рассмотренных генов в группах, генетически сцепленных с геном *lepr*, а также у генов, локализованных в хромосоме X, и фактически отсутствуют у рассмотренных видов между повторами в генах хроматиновой петли. Наиболее часто статистически достоверные корреляции обнаруживаются между различными типами диспергированных повторов и количеством микросателлитов (STR).

Учитывая то, что представленность STR в определенной степени может представлять отпечатки ранее пребывавших в геномных участках ретротранспозонов [64, 65], следует отметить, что суммарное количество STR в генах, генетически сцепленных с *mlph*, у всех видов (человек – 33, крупный рогатый скот – 41, домашний кролик – 36, домовая мышь – 71) почти в два раза меньше, чем в генах, окружающих *mstn* (человек – 61, крупный рогатый скот – 106, домашний кролик – 98, домовая мышь – 135) вне зависимости от принадлежности к разным аутосомам (табл. 1–4). Так, распределение повторов зависит прежде всего от гена, затем от вида, но не от хромосомы, в которой он локализован.

Короткий ген длиной в 1689 п.н. (*pgam4*) присутствует в группе сцепления генов с геном *atrx* в хромосоме X только у человека и, предположительно, является результатом кооптации транспозона, лишен транспозонов и интронов (1 экзон) и исключен из анализа.

Для выяснения зависимости количества повторов от длины гена выполнено сравнение их количества в самых коротких генах (табл. 7). Данные показали отсутствие прямой связи между количеством экзонов, длиной гена и количеством повторов в гене.



«Молодые» повторы – SINE/Alu, SINE/tRNA-C у человека, SINE/tRNA-C у крупного скота, домашнего кролика, домовой мыши; LINE/L1 у всех видов; «древние» повторы – SINE/MIR, LINE/L2 и эндогенные ретровирусы (LTR), ДНК транспозонов (DNA), микросателлиты (STR) в генах хроматиновой петли, объединяющей гены, продукты которых функционируют в клетках головного мозга: *auts2* – фактор регуляции транскрипции, *galnt17* – фермент гликозилирования белков, *caln1* – кальций связывающий белок

Рисунок 6. Количество разных повторов в 3 генах хроматиновой петли человека (a), крупного рогатого скота (b), домашнего кролика (c), домовой мыши (d)

Figure 6. Different repeats in 3 chromatin loop genes of *Homo sapiens* (a), *Bos taurus* (b), *Oryctolagus cuniculus* (c), and *Mus musculus* (d)

Сравнительно коротким геном с небольшим количеством экзонов также является ген *leprot* (человек – 15339 п.н., 6 экзонов; крупный рогатый скот – 13839 п.н., 5 экзонов; домашний кролик – 12787 п.н., 5 экзонов; домовая мышь – 11639 п.н., 5 экзонов), последовательность которого прямо перекрывается с последовательностью гена рецептора лептина (*lepr*). Возможно, такое вложение должно снизить число повторов по сравнению с короткими, но неперекрывающимися генами, однако количество повторов (человек – 29, крупный рогатый скот – 23, домашний кролик – 24, домовая мышь – 31) оказалось близким к выявленным у коротких генов, локализованным в хромосоме X и сходных по длине с геном *leprot* (табл. 7). Отсутствие влияния на частоту повторов перекрытия генов обнаруживается и в связи с геном *mstn*, который полностью перекрывается геном *akap19* у человека, частично у домашнего кролика (рис. 1). Также он относительно независимо локализован у крупного рогатого скота и у домовой мыши, у которых рядом с геном *mstn* расположен ген *c2orf88* – ортолог гена *akap19*. Из этого следует отсутствие прямого влияния на представленность повторов в генах в условиях их перекрывания другим геном.

У человека, в отличие от других видов, в группе генов, генетически сцепленных с геном *lepr*, обнаруживается существенное преобладание среди повторов «старых» вариантов SINE/MIR и LINE/L2 (рис. 4), так же как у домашнего кролика среди генов, сцепленных с геном *mstn* (рис. 3). С чем может быть связана видоспецифичная сохранность этих древних, консервативных повторов вокруг двух генов (*mstn* у кролика и *lepr* у человека) остается непонятным, но она подчеркивает геномную и генную особенность распределения транспозонов, а также скоростей вытеснения «древних» транспозонов «молодыми».

Видоспецифичность распределения таких повторов представлена не только на уровне генных блоков, но и на уровне геномов разных исследуемых видов (табл. 8).

Рассмотренные виды подразделяются на 2 группы: одна – человек и крупный рогатый скот, в геномах которых относительно повышена частота встречаемости «древних» SINE/MIR и LINE/L2 диспергированных повторов (2,9 и 3,7 у человека; 2,7 и 2,7 у крупного рогатого скота) по сравнению со второй группой, в которую входят домашний кролик (1,6 и 1,8) и домовая мышь (0,6 и 0,4).

Таблица 5. Статистически достоверные положительные взаимосвязи между количеством копий разных повторов в группе генов, генетически сцепленных с *mlph*

Table 5. Statistically significant positive relationships between the number of copies of different repeats in a group of genes genetically linked to *mlph*

Повторы	SINE/Alu, tRNA-C	SINE/MIR	LINE/L1	LINE/L2	LTR	DNA
Человек						
SINE/Alu, tRNA-C	–	–	–	–	–	–
MIR	–	–	–	–	–	–
L1	–	–	–	–	–	–
L2	$p < 0,01$	–	–	–	–	–
LTR	$p < 0,01$	–	–	–	–	–
DNA	$p < 0,01$	–	–	$p < 0,01$	$p < 0,01$	–
STR	–	–	–	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,01$
Крупный рогатый скот						
SINE/tRNA-C	–	–	–	–	–	–
MIR	$p < 0,01$	–	–	–	–	–
L1	$p < 0,05$	–	–	–	–	–
L2	$p < 0,05$	–	–	–	–	–
LTR	$p < 0,05$	–	$p < 0,01$	–	$p < 0,05$	–
DNA	$p < 0,05$	$p < 0,01$	–	–	–	–
STR	–	–	$p < 0,05$	–	$p < 0,05$	$p < 0,05$
Домашний кролик						
SINE/tRNA-C	–	–	–	–	–	–
MIR	$p < 0,01$	–	–	–	–	–
L1	$p < 0,01$	$p < 0,05$	–	–	–	–
L2	–	–	–	–	–	–
LTR	$p < 0,01$	$p < 0,05$	$p < 0,01$	–	–	–
DNA	–	–	–	–	–	–
STR	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,01$	–	$p < 0,01$	–
Домовая мышь						
SINE/tRNA-C	–	–	–	–	–	–
MIR	–	–	–	–	–	–
L1	$p < 0,01$	–	–	–	–	–
L2	–	–	–	–	–	–
LTR	$p < 0,05$	–	–	–	–	–
DNA	–	–	–	–	$p < 0,01$	–
STR	$p < 0,05$	–	–	–	–	$p < 0,01$

Таблица 6. Статистически достоверные положительные взаимосвязи между количеством копий разных повторов в группе генов, генетически сцепленных с *mstn*

Table 6. Statistically significant positive relationships between the number of copies of different repeats in a group of genes genetically linked to *mstn*

Повторы	SINE/Alu, tRNA-C	SINE/MIR	LINE/L1	LINE/L2	LTR	DNA
Человек						
SINE/Alu, tRNA-C	–	–	–	–	–	–
MIR	$p < 0,01$	–	–	–	–	–
L1	$p < 0,01$	$p < 0,01$	–	–	–	–
L2	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,01$	–	–	–
LTR	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,001$	–	–
DNA	$p < 0,01$	$p < 0,05$	$p < 0,05$	$p < 0,05$	$p < 0,001$	–
STR	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,05$	$p < 0,05$	$p < 0,01$	$p < 0,01$
Крупный рогатый скот						
SINE/tRNA-C	–	–	–	–	–	–
MIR	$p < 0,01$	–	–	–	–	–
L1	$p < 0,001$	$p < 0,001$	–	–	–	–
L2	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,05$	–	–	–
LTR	$p < 0,05$	$p < 0,05$	$p < 0,05$	–	–	–
DNA	$p < 0,05$	$p < 0,05$	$p < 0,01$	–	–	–
STR	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,01$	$p < 0,05$	$p < 0,05$	$p < 0,05$

Продолжение таблицы 6

Повторы	SINE/Alu, tRNA-C	SINE/MIR	LINE/L1	LINE/L2	LTR	DNA
Домашний кролик						
SINE/tRNA-C	–	–	–	–	–	–
MIR	$p < 0,01$	–	–	–	–	–
L1	–	–	–	–	–	–
L2	$p < 0,05$	$p < 0,05$	–	–	–	–
LTR	–	–	–	–	–	–
DNA	–	–	–	–	–	–
STR	$p < 0,01$	$p < 0,01$	–	$p < 0,05$	$p < 0,01$	–
Домовая мышь						
SINE/tRNA-C	–	–	–	–	–	–
MIR	–	–	–	–	–	–
L1	$p < 0,01$	–	–	–	–	–
L2	–	–	–	–	–	–
LTR	–	–	–	–	–	–
DNA	$p < 0,01$	–	–	–	–	–
STR	–	–	$p < 0,05$	–	–	$p < 0,01$

Таблица 7. Суммарное количество повторов в самых коротких по длине из рассмотренных генов у человека, крупного рогатого скота, домашнего кролика и домовой мыши

Table 7. Total number of repeats in the shortest genes examined in *Homo sapiens*, *Bos taurus*, *Oryctolagus cuniculus*, and *Mus musculus*

Вид	Ген, количество экзонов	Координаты генов (длины генов, п.н.)	SINE/Alu, tRNA-C	SINE/ MIR	LINE/ L1	LINE/ L2	LINE/ LTR	DNA	STR	Суммарно
Среди группы генов, сцепленных с *mlph*										
Человек	*prlh*, 2	237566574..237567175 (601)	0	0	0	0	0	0	0	0
Крупный рогатый скот	*prlh*, 2	117013542..117014310 (768)	1	0	1	0	0	0	0	2
Домашний кролик	*prlh*, 3	2695431..2697452 (2021)	1	0	0	0	0	0	0	1
Домовая мышь	*prlh*, 3	90879545..90881848 (2303)	0	0	1	0	1	0	0	2
Среди группы генов, сцепленных с *mstn*										
Человек	*mstn*, 3	190055700..190062729 (7029)	0	0	1	1	0	1	2	5
Крупный рогатый скот	*mstn*, 3	6278864..6285491 (6627)	6	2	1	5	1	0	1	16
Домашний кролик	*mstn*, 3	50301113..50306022 (4909)	2	2	1	0	0	3	1	9
Домовая мышь	*mstn*, 3	53100799..53107238 (6439)	2	0	4	0	9	0	3	18
Среди группы генов, локализованных в хромосоме X										
Человек	*cox7b*, 3	77899468..77907376 (7908)	11	1	3	1	0	1	3	20
Крупный рогатый скот	*cox7b*, 3	74502510..74507315 (4805)	3	1	9	0	0	3	0	16
Домашний кролик	*cox7b*, 3	72158789..72164232 (5443)	8	0	4	0	0	1	4	17
Домовая мышь	*cox7b*, 3	105059306..105066056 (6750)	1	0	0	1	8	0	0	10
Человек	*fgf16*, 3	77447389..77457278 (9889)	3	1	3	0	0	1	4	12
Крупный рогатый скот	*fgf16*, 3	74909582..74917602 (8020)	5	0	6	0	3	1	2	17
Домашний кролик	*fgf16*, 3	72470347..72480290 (9943)	11	0	10	1	0	1	0	23
Домовая мышь	*fgf16*, 3	104808083..104820138 (12055)	2	0	3	0	9	0	7	21

Таблица 8. Частота встречаемости диспергированных (не-LTR) и тандемных повторов в геномах человека, крупного рогатого скота, домашнего кролика и домовой мыши, %

Table 8. Frequency of interspersed (non-LTR) and tandem repeats in genomes of *Homo sapiens*, *Bos taurus*, *Oryctolagus cuniculus*, and *Mus musculus*, %

Повторы / Вид	SINE/Alu, tRNA-C	SINE/MIR	LINE/L1	LINE/L2	STR
Человек	10,5	2,9	17,5	3,7	1,5
Крупный рогатый скот	9,4	2,7	26,2	2,7	0,9
Домашний кролик	18,4	1,6	14,9	1,8	1,4
Домовая мышь	7,2	0,6	19,9	0,4	3,1

Примечание: на основе данных из источника https://www.repeatmasker.org/genomicDatasets/RMGenomicDatasets.html

Note: based on data from https://www.repeatmasker.org/genomicDatasets/RMGenomicDatasets.html

Выраженное отличие генома домашнего кролика от других видов крупных млекопитающих по относительно повышенной частоте встречаемости «молодых» SINE среди диспергированных повторов описана в источнике [66]. Выполнено также сравнение эволюционных скоростей утраты и приобретения диспергированных повторов у человека и домовой мыши. Геном мыши характеризуется ускоренной потерей и заменой «древних» повторов по сравнению с человеком. Только около 40 % геномной ДНК сохраняется общей со времен расхождения этих двух видов от предкового (примерно 100 млн лет назад) [8].

Накопленные данные позволяют предположить, что на геномном уровне наблюдаемые отличия по количеству «молодых» и «древних» диспергированных повторов ДНК и, соответственно, вытеснению «древних» «молодыми» в определенной степени обусловлены различиями в плодовитости (например, многоплодные – домашний кролик, домовая мышь и малоплодные – человек, крупный рогатый скот) и скоростью смены поколений.

Межгенные отличия могут иметь сложную природу. Так, сохранение «древних» повторов SINE/MIR и LINE/L2 в генах, фланкирующих ген *mstn* у домашнего кролика, может быть обусловлено определенной нестабильностью этого геномного региона, в котором у других видов происходит замена гена *akap19* на ген *c2orf88*. У кролика 5’ фланг гена *mstn* перекрывается с 5’флангом гена *akap19*, что, потенциально, может требовать определенной повышенной защищенности от вытеснения «древних» повторов. Поскольку в области 5’флангов белок-кодирующих генов расположены нуклеотидные мотивы, тесно связанные с регуляцией генной экспрессии, можно ожидать, что защищенность от встроек транспозонов способна определяться не столько фактом перекрывания (вложенности) одного гена в другой, сколько специфическими нуклеотидными мотивами в такой общей области.

В группе генов, генетически сцепленных с геном *lepr*, обнаруживаются две особенности: у человека наблюдаются по крайней мере две инверсии порядка генов по сравнению с другими видами и, кроме того, у этих генов присутствует выраженная изменчивость по количеству экзонов (человек, крупный рогатый скот, домашний кролик, домовая мышь: в гене *dnajc6* – 21, 21, 24, 23 экзона; в гене *lepr* – 20, 21, 27, 21 экзон; в гене *pde4b* – 25, 16, 23, 26 экзонов; *sgip1* – 29, 25, 28, 29 экзонов соответственно). Поскольку изменчивость по количеству экзонов предполагает присутствие специфических условий и особенностей транспозонов, способствующих этому процессу [67], возможно, их наличие в этом регионе способствовало и увеличению инверсий порядка генов, и отклонениям от количества экзонов, типичных для других видов. Так, в определенной степени увеличение нестабильности в регионе локализации этой группы генов, по-видимому, способствовало сохранению у человека «древних» диспергированных элементов (рис. 4).

Полученные данные позволяют заключить, что полногеномные исследования только приблизительно отражают события, происходящие на уровне отдельных генов, которые необходимо учитывать при разработке дизайна генного редактирования, перенесения результатов, полученных на одном объекте на другой и, соответственно, прогнозирования ожидаемых результатов. Это приводит к необходимости сравнительного анализа организации и эволюции конкретных геномных участков, потенциальных мишеней редактирования.

Выводы

На геномном уровне обнаружены отличия между исследованными видами млекопитающих по вытеснению «древних» диспергированных повторов «молодыми» диспергированными повторами у многоплодных видов с коротким периодом смены поколений (домашний кролик, домовая мышь) по сравнению с крупными, малоплодными млекопитающими с относительно большим периодом смены поколений (человек, крупный рогатый скот).

На основании анализа функциональных особенностей среди генов, генетически сцепленных с генами меланофилина (*mlph*), миостатина (*mstn*), рецептора лептина (*lepr*), ремоделинга хроматина (*atrx*)

и эволюционно консервативной хроматиновой петли *ayts2, galnt17*, и *caln1*, выделены 5 функциональных групп, кодируемых соответствующими генами: 4 генетически тесно сцепленных гена с геном *lepr* вовлечены во внутриклеточный трафик сигнальных молекул; 4 гена, сцепленных с геном *mlph* – в межклеточный трафик сигнальных молекул; 4 фланговых гена для гена *mstn* – в фундаментальные внутриклеточные биохимические процессы (метаболизм липидов, глюкозы, трикарбоновых кислот, репарации ДНК); продукты четырех тесно сцепленных генов с *atrx*, локализованные в хромосоме X у всех млекопитающих, контролируют трафик магния, меди, темпы клеточного деления и антиоксидантную защиту; 3 гена хроматиновой петли *ayts2, galnt17*, и *caln1* связаны с нейрогенезом.

У всех исследуемых видов наименьшим количеством повторов отличалась группа генов, генетически сцепленных с *mlph*, наибольшим – входящие в хроматиновую петлю. Несмотря на известный избыток диспергированного повтора LINE/L1 в хромосоме X, в связи с механизмом инактивации одной из хромосом X у млекопитающих, это реализуется не у всех генов, локализованных в хромосоме X. Не выявлено прямого влияния перекрывания нуклеотидных последовательностей генов на частоту встречаемости повторов. Наибольшее количество статистически достоверных положительных корреляций обнаруживается между разными повторами в группах генов, сцепленных с *mstn* (за исключением домашнего кролика) и *lepr*, наименьшее – в хроматиновой петле 3 генов. Наиболее часто в положительные корреляции с транспозонами вовлекались микросателлитные повторы (STR). Выделены два блока генов, в которых, в отличие от других, обнаруживается повышенная частота встречаемости «древних» диспергированных повторов (SINE/MIR, LINE/L2): у домашнего кролика – генетически сцепленных с геном *mstn*, у человека – с геном *lepr*. У домашнего кролика локализация гена *mstn* отличается от других видов тем, что его 5’ фланг частично перекрывается с 5’флангом гена *akap19*; у человека область локализации группы генов, генетически сцепленных с геном *lepr*, отличается по инверсиям от других рассмотренных видов, а также изменчивостью по количеству экзонов у разных видов по генам этой группы. То есть, оба этих геномных участка характеризуются определенной нестабильностью. По-видимому, это и может лежать в основе относительно повышенной частоты сохранения и, соответственно, встречаемости в них «древних» повторов.

Таким образом, поскольку геномные отличия, генспецифические особенности распределения диспергированных и тандемных повторов играют фундаментальную роль в структурно-функциональной организации генома, они требуют особого внимания при подборе мишеней генного редактирования.

Критерии авторства

Авторы внесли равный вклад в создание настоящей 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 declared no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы / References

1. Alariqi M, Ramadan M, Yu L, Hui F, Hussain A, *et al*. Enhancing specificity, precision, accessibility, flexibility, and safety to overcome traditional CRISPR/Cas editing challenges and shape future innovations. Advanced Science. 2025; 12(28):e2416331. https://doi.org/10.1002/advs.202416331

2. Pandey S, Choudhari JK, Tripathi A, Singh A, Antony A, *et al*. Artificial intelligence-based genome editing in CRISPR/Cas9. Artificial Intelligence (AI) in Cell and Genetic Engineering. 2025;2952:273–282. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-4690-8_16

3. Косовский Г. Ю., Скобель О. И., Глазко Т. Т. Потенциальные источники негативных эффектов генного редактирования у животных. Сельскохозяйственная биология. 2024. Т. 59. № 6. С. 1118–1130. [Kosovsky GYu, Skobel OI, Glazko TT. Potential sources of negative effects of gene editing in animals. Agricultural Biology. 2024;59(6):1118–1130. (In Russ.)] https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.6.1118eng

4. Глазко В. И., Косовский Г. Ю., Глазко Т. Т. Геномное редактирование животных сельскохозяйственных видов. Рязань: Book Jet; 2024. 164 с. [Glazko VI, Kosovskiy GYu, Glazko TT. Genomic editing of livestock animals. Ryazan: Book Jet; 2024. 164 p. (In Russ.)]

5. Kwon D-H, Gim G-M, Yum S-Y, Jang G. Current status and future of gene engineering in livestock. BMB Reports. 2024;57(1):50–59. https://doi.org/10.5483/BMBRep.2023-0208

6. Tahsin A, Tasnim Z, Chowdhury M, Hassin K, Meraz GH, *et al*. CRISPR-Embedding: CRISPR/Cas9 off-target activity prediction using DNA *k*-mer embedding. Computational and Structural Biotechnology Reports. 2025;2:100043. https://doi.org/10.1016/j.csbr.2025.100043

7. Groza T, Gomez FL, Mashhadi HH, Muñoz-Fuentes V, Gunes O, *et al*. The international mouse phenotyping consortium: Comprehensive knockout phenotyping underpinning the study of human disease. Nucleic Acids Research. 2023;51(D1): D1038–D1045. https://doi.org/10.1093/nar/gkac972

8. Buckley RM, Kortschak RD, Adelson DL. Divergent genome evolution caused by regional variation in DNA gain and loss between human and mouse. PLOS Computational Biology. 2018;14(4):e1006091. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006091

9. Ali A, Han K, Liang P. Role of transposable elements in gene regulation in the human genome. Life. 2021;11(2):118. https://doi.org/10.3390/life11020118

10. Modzelewski AJ, Gan Chong J, Wang T, He L. Mammalian genome innovation through transposon domestication. Nature Cell Biology. 2022;24(9):1332–1340. https://doi.org/10.1038/s41556-022-00970-4

11. Zeng L, Pederson SM, Kortschak RD, Adelson DL. Transposable elements and gene expression during the evolution of amniotes. Mobile DNA. 2018;9:17. https://doi.org/10.1186/s13100-018-0124-5

12. Gebrie A. Transposable elements as essential elements in the control of gene expression. Mobile DNA. 2023;14(1):9. https://doi.org/10.1186/s13100-023-00297-3

13. Monsen Ø, Grønvold L, Datsomor A, Harvey T, Kijas J, *et al*. The role of transposon activity in shaping cis-regulatory element evolution after whole-genome duplication. Genome Research. 2025;35(3):475–488. https://doi.org/10.1101/gr.278931.124

14. Silaeva YY, Safonova PD, Popov DV, Filatov MA, Okulova YuD, *et al*. Generation of *LEPR* knockout rabbits with CRISPR/CAS9 system. Doklady Biological Sciences. 2024;518:248–255. https://doi.org/10.1134/S0012496624600234

15. Andrade P, Alves JM, Pereira P, Rubin CJ, Silva E, *et al*. Selection against domestication alleles in introduced rabbit populations. Nature Ecology & Evolution. 2024;8(8):1543–1555. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02443-3

16. Farré M, Kim J, Proskuryakova AA, Zhang Y, Kulemzina AI, *et al*. Evolution of gene regulation in ruminants differs between evolutionary breakpoint regions and homologous synteny blocks. Genome Research. 2019;29(4):576–589. https://doi.org/10.1101/gr.239863.118

17. Damas J, Corbo M, Kim J, Turner-Maier J, Farré M, *et al*. Evolution of the ancestral mammalian karyotype and syntenic regions. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2022;119(40):e2209139119. https://doi.org/10.1073/pnas.2209139119

18. Li L, Zhang T, Farhab M, Xia XX, Reza AMMT, *et al*. Comprehensive analysis of *circRNAs* and *lncRNAs* involvement in the development of skeletal muscle in myostatin-deficient rabbits. Animal Biotechnology. 2025;36(1):2465624. https://doi.org/10.1080/10495398.2025.2465624

19. Lee J, Kim D-H, Lee K. Research note: Injection of adenoviral CRISPR/Cas9 system targeting melanophilin gene into different sites of embryos induced regional feather color changes in posthatch quail. Poultry Science. 2023;102(11):103087. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103087

20. Chen CY, Seward CH, Song Y, Inamdar M, Leddy AM, *et al*. *Galnt17* loss-of-function leads to developmental delay and abnormal coordination, activity, and social interactions with cerebellar vermis pathology. Developmental Biology. 2022;490:155–171. https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2022.08.002

21. Hubley R, Finn RD, Clements J, Eddy SR, Jones TA, *et al*. The Dfam database of repetitive DNA families. Nucleic Acids Research. 2016;44(D1):D81–D89. https://doi.org/10.1093/nar/gkv1272

22. Sriwastva MK, Deng ZB, Wang B, Teng Y, Kumar A, *et al*. Exosome-like nanoparticles from Mulberry bark prevent DSS-induced colitis via the AhR/COPS8 pathway. EMBO Reports. 2022;23(3):e53365. https://doi.org/10.15252/embr.202153365

23. Liu Y, Shah SV, Xiang X, Wang J, Deng ZB, *et al*. COP9-associated CSN5 regulates exosomal protein deubiquitination and sorting. The American Journal of Pathology. 2009;174(4):1415–1425. https://doi.org/10.2353/ajpath.2009.080861

24. Wang H, Mizuno K, Takahashi N, Kobayashi E, Shirakawa J, *et al*. Melanophilin accelerates insulin granule fusion without predocking to the plasma membrane. Diabetes. 2020;69(12):2655–2666. https://doi.org/10.2337/db20-0069

25. Chon NL, Tran S, Miller CS, Lin H, Knight JD. A conserved electrostatic membrane-binding surface in synaptotagmin-like proteins revealed using molecular phylogenetic analysis and homology modeling. Protein Science. 2024;33(1):e4850. https://doi.org/10.1002/pro.4850

26. Babina M, Franke K, Bal G. How “neuronal” are human skin mast cells? International Journal of Molecular Sciences. 2022;23(18):10871. https://doi.org/10.3390/ijms231810871

27. Bed’hom B, Vaez M, Coville JL, Gourichon D, Chastel O, *et al*. The *lavender* plumage colour in Japanese quail is associated with a complex mutation in the region of *MLPH* that is related to differences in growth, feed consumption and body temperature. BMC Genomics. 2012;13:442. https://doi.org/10.1186/1471-2164-13-442

28. Ly T, Oh JY, Sivakumar N, Shehata S, La Santa Medina N, *et al*. Sequential appetite suppression by oral and visceral feedback to the brainstem. Nature. 2023;624:130–137. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06758-2

29. Beaumont KA, Hamilton NA, Moores MT, Brown DL, Ohbayashi N, *et al*. The recycling endosome protein Rab17 regulates melanocytic filopodia formation and melanosome trafficking. Traffic. 2011;12(5):627–643. https://doi.org/10.1111/j.1600-0854.2011.01172.x

30. Li P, Zhang Q, Tang H. INPP1 up-regulation by miR-27a contributes to the growth, migration and invasion of human cervical cancer. Journal of Cellular and Molecular Medicine. 2019;23(11):7709–7716. https://doi.org/10.1111/jcmm.14644

31. Molloy AM, Pangilinan F, Mills JL, Shane B, O'Neill MB, *et al*. A common polymorphism in *HIBCH* influences methylmalonic acid concentrations in blood independently of cobalamin. The American Journal of Human Genetics. 2016; 98(5):869–882. https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2016.03.005

32. Dias AP, Rehmani T, Salih M, Tuana B. Tail-anchored membrane protein SLMAP3 is essential for targeting centrosomal proteins to the nuclear envelope in skeletal myogenesis. Open Biology. 2024;14(10):240094. https://doi.org/10.1098/rsob.240094

33. Grobet L, Martin LJR, Poncelet D, Pirottin D, Brouwers B, *et al*. A deletion in the bovine myostatin gene causes the double-muscled phenotype in cattle. Nature Genetics. 1997;17:71–74. https://doi.org/10.1038/ng0997-71

34. Kambadur R, Sharma M, Smith TP, Bass JJ. Mutations in *myostatin* (*GDF8*) in double-muscled Belgian Blue and Piedmontese cattle. Genome Research. 1997;7:910–915. https://doi.org/10.1101/gr.7.9.910

35. Mosher DS, Quignon P, Bustamante CD, Sutter NB, Mellersh CS, *et al*. A mutation in the myostatin gene increases muscle mass and enhances racing performance in heterozygote dogs. PLOS Genetics. 2007;3(5):e79. https://doi.org/10.1371/journal.pgen.0030079

36. Boman IA, Våge DI. An insertion in the coding region of the *myostatin* (*MSTN*) gene affects carcass conformation and fatness in the Norwegian Spælsau (*Ovis aries*). BMC Research Notes. 2009;2:98. https://doi.org/10.1186/1756-0500-2-98

37. Sahu AR, Jeichitra V, Rajendran R, Raja A. Novel report on mutation in exon 3 of myostatin (*MSTN*) gene in Nilagiri sheep: An endangered breed of South India. Tropical Animal Health and Production. 2019;51:1817–1822. https://doi.org/10.1007/s11250-019-01873-7

38. Stinckens A, Luyten T, Bijttebier J, Van den Maagdenberg K, Dieltiens D, *et al*. Characterization of the complete porcine *MSTN* gene and expression levels in pig breeds differing in muscularity. Animal Genetics. 2008;39(6):586–596. https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2008.01774.x

39. Schuelke M, Wagner KR, Stolz LE, Hübner C, Riebel T, *et al*. Myostatin mutation associated with gross muscle hypertrophy in a child. The New England Journal of Medicine. 2004;350(26):2682–2688. https://doi.org/10.1056/NEJMoa040933

40. Saunders MA, Good JM, Lawrence EC, Ferrell RE, Li W-H, *et al*. Human adaptive evolution at *myostatin* (*GDF8*), a regulator of muscle growth. The American Journal of Human Genetics. 2006;79(6):1089–1097. https://doi.org/10.1086/509707

41. Marzec P, Richer M, Lahue RS. Therapeutic targeting of mismatch repair proteins in triplet repeat expansion diseases. DNA Repair. 2025;147:103817. https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2025.103817

42. Edvardson S, Cinnamon Y, Ta-Shma A, Shaag A, Yim YI, *et al*. A deleterious mutation in *DNAJC6* encoding the neuronal-specific clathrin-uncoating co-chaperone auxilin, is associated with juvenile parkinsonism. PLOS One. 2012;7(5):e36458. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036458

43. Han Y-C, Ma B, Guo S, Yang M, Li L-J, *et al*. Leptin regulates disc cartilage endplate degeneration and ossification through activation of the MAPK-ERK signalling pathway *in vivo* and *in vitro*. Journal of Cellular and Molecular Medicine. 2018;22(4):2098–2109. https://doi.org/10.1111/jcmm.13398

44. Xiao H, Li W, Qin Y, Lin Z, Qian C, *et al*. Crosstalk between lipid metabolism and bone homeostasis: Exploring intricate signaling relationships. Research. 2024;7:0447. https://doi.org/10.34133/research.0447

45. Londraville RL, Tuttle M, Liu Q, Andronowski JM. Endospanin is a candidate for regulating leptin sensitivity. Frontiers in Physiology. 2022;12:786299. https://doi.org/10.3389/fphys.2021.786299

46. Su Y, Ding J, Yang F, He C, Xu Y, *et al*. The regulatory role of PDE4B in the progression of inflammatory function study. Frontiers in Pharmacology. 2022;13:982130. https://doi.org/10.3389/fphar.2022.982130

47. Decet M, Scott P, Kuenen S, Meftah D, Swerts J, *et al*. A candidate loss-of-function variant in SGIP1 causes synaptic dysfunction and recessive parkinsonism. Cell Reports Medicine. 2024;5(10):101749. https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2024.101749

48. Fang Y, Barrows D, Dabas Y, Carroll TS, Singer S, *et al*. ATRX guards against aberrant differentiation in mesenchymal progenitor cells. Nucleic Acids Research. 2024;52(9):4950–4968. https://doi.org/10.1093/nar/gkae160

49. Rigueur D. A primer for fibroblast growth factor 16 (FGF16). Differentiation. 2024;140:100817. https://doi.org/10.1016/j.diff.2024.100817

50. Del Pino Molina L, Monzón Manzano E, Gianelli C, Bravo Gallego LY, Bujalance Fernández J, *et al*. Effects of two different variants in the *MAGT1* gene on B cell subsets, platelet function, and cell glycome composition. Frontiers in Immunology. 2025;16:1547808. https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1547808

51. Liu X, Li W, Yang C, Luo J, Tang B. Cuproptosis-related genes signature could predict prognosis and the response of immunotherapy in cervical cancer. Translational Cancer Research. 2025;14(1):129–140. https://doi.org/10.21037/tcr-24-641

52. Bai T, Wang L, Qiao Z, Wang Z. Cuproptosis, a potential target for the therapy of diabetic critical limb ischemia. Free Radical Biology and Medicine. 2025;234:131–140. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2025.04.022

53. Lu B, Nie X-H, Yin R, Ding P, Su Z-Z, *et al*. PGAM4 silencing inhibited glycolysis and chemoresistance to temozolomide in glioma cells. Cell Biology International. 2023;47(4):776–786. https://doi.org/10.1002/cbin.11983

54. Hori K, Shimaoka K, Hoshino M. *AUTS2* gene: Keys to understanding the pathogenesis of neurodevelopmental disorders. Cells. 2021;11(1):11. https://doi.org/10.3390/cells11010011

55. Weisner PA, Chen CY, Sun Y, Yoo J, Kao WC, *et al*. A mouse mutation that dysregulates neighboring *Galnt17* and *Auts2* genes is associated with phenotypes related to the human AUTS2 syndrome. G3 Genes. 2019;9(11):3891–3906. https://doi.org/10.1534/g3.119.400723

56. Raman J, Guan Y, Perrine CL, Gerken TA, Tabak LA. UDP-*N*-acetyl-*α*-D-galactosamine: polypeptide *N*-acetylgalactosaminyltransferases: Completion of the family tree. Glycobiology. 2012;22(6):768–777. https://doi.org/10.1093/glycob/cwr183

57. Narimatsu Y, Büll C, Chen Y-H, Wandall HH, Yang Z, *et al*. Genetic glycoengineering in mammalian cells. Journal of Biological Chemistry. 2021;296:100448. https://doi.org/10.1016/j.jbc.2021.100448

58. Engmann O, Labonté B, Mitchell A, Bashtrykov P, Calipari ES, *et al*. Cocaine-induced chromatin modifications associate with increased expression and three-dimensional looping of *Auts2*. Biological Psychiatry. 2017;82(11):794–805. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2017.04.013

59. Courchesne E, Karns CM, Davis HR, Ziccardi R, Carper RA, *et al*. Unusual brain growth patterns in early life in patients with autistic disorder: An MRI study. Neurology. 2011;76(24):2111. https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000399191.79091.28

60. Kelly E, Meng F, Fujita H, Morgado F, Kazemi Y, *et al*. Regulation of autism-relevant behaviors by cerebellar-prefrontal cortical circuits. Nature Neuroscience. 2020;23:1102–1110. https://doi.org/10.1038/s41593-020-0665-z

61. Gilbert J, Man H-Y. Fundamental elements in autism: From neurogenesis and neurite growth to synaptic plasticity. Frontiers in Cellular Neuroscience. 2017;11:359. https://doi.org/10.3389/fncel.2017.00359

62. Warren WC, Hillier LW, Marshall Graves JA, Birney E, Ponting CP, *et al*. Genome analysis of the platypus reveals unique signatures of evolution. Nature. 2008;453:175–183. https://doi.org/10.1038/nature06936

63. Adelson DL, Raison JM, Edgar RC. Characterization and distribution of retrotransposons and simple sequence repeats in the bovine genome. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2009;106(31):12855–12860. https://doi.org/10.1073/pnas.0901282106

64. Glazko VI, Kosovsky GYu, Glazko TT. The sources of genome variability as domestication drivers (review). Agricultural Biology. 2022;57(5):832–851. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.5.832eng

65. Zattera ML, Bruschi DP. Transposable elements as a source of novel repetitive DNA in the eukaryote genome. Cells. 2022;11(21):3373. https://doi.org/10.3390/cells11213373

66. Zhao P, Peng C, Fang L, Wang Z, Liu GE. Taming transposable elements in livestock and poultry: A review of their roles and applications. Genetics Selection Evolution. 2023;55(1):50. https://doi.org/10.1186/s12711-023-00821-2

67. Mikina W, Hałakuc P, Milanowski R. Transposon-derived introns as an element shaping the structure of eukaryotic genomes. Mobile DNA. 2024;15(1):15. https://doi.org/10.1186/s13100-024-00325-w

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Косовский Глеб Юрьевич / Gleb Yu. Kosovsky ORCID 0000-0003-3808-3086; eLIBRARY SPIN 3736-3480
Глазко Татьяна Теодоровна / Tatiana T. Glazko ORCID 0000-0002-3879-6935; eLIBRARY SPIN 9581-8980

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2606
https://elibrary.ru/NEYDKD

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Биологический потенциал бактериального штамма рода *Pantoea* в защите от биотического стресса и стимуляции роста зерновых культур

Е. Е. Бородина[1,*], А. В. Гордиенко[2], И. И. Плешивцев[1], Н. В. Фотина[1], А. М. Федорова[1], В. В. Мартиросян[3]

[1] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

[2] *ООО «Азот-Агро», Кемерово, Россия*

[3] *Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, Москва, Россия*

Поступила в редакцию: 03.07.2025
Принята после рецензирования: 05.09.2025
Принята к публикации: 07.10.2025

**e-mail: kborodina1908@gmail.com*
© Е. Е. Бородина, А. В. Гордиенко, И. И. Плешивцев, Н. В. Фотина, А. М. Федорова, В. В. Мартиросян, 2025

Аннотация.
Овес (*Avena sativa* L.), являясь одной из важнейших сельскохозяйственных культур, подвержен воздействию широкого спектра фитопатогенных микроорганизмов, вызывающих значительные потери урожая. В связи с этим разработка эффективных и экологически безопасных методов защиты овса от инфекционных заболеваний представляет собой актуальную задачу современного сельского хозяйства. Цель исследования – изучить характеристики нового бактериального штамма рода *Pantoea*, выделенного из зерновых культур, для оценки его потенциала в качестве антагониста фитопатогенов и ростостимулятора растений.
Объект исследования – бактериальный штамм, изолированный из ярового овса сорта Маручак. Таксономическую идентификацию штамма проводили по последовательности гена 16S рРНК. Антагонистическую активность штамма оценивали в отношении фитопатогенов *Fusarium graminearum* F-877, *Bipolaris sorokiniana* F-529, *Erwinia rhapontici* B-9292 и *Xanthomonas campestris* B-4102. Способность штамма продуцировать фитогормоны и сидерофоры определяли спектрофотометрически. Способность штамма фиксировать атмосферный азот оценивали на анализаторе азота Rapid N Cube; солюбилизацию неорганических фосфатов, калия и цинка, а также способность к формированию биопленок определяли культурально-зависимыми методами.
Выделенный штамм идентифицирован как *Pantoea pleuroti*. Штамм проявлял антагонистическую активность в отношении исследованных фитопатогенов; наибольший эффект отмечен в отношении *F. graminearum* F-877: зона ингибирования составила 62 мм (метод диффузии из агаровых блоков) и 12 мм (метод агаровых лунок). Штамм продуцировал фитогормоны: индолил-3-уксусную кислоту – 5,64 мг/мл, гиббереллиновую кислоту – 284,3 мкг/мл, кинетин – 9,46 мкг/мл; фиксировал атмосферный азот (680,0 мкг/мл); синтезировал сидерофоры (53,1 %); солюбилизировал фосфаты (102,3 мкг/мл), калий и цинк, а также образовывал биопленки.
Полученные результаты подтверждают перспективность применения штамма *P. pleuroti* в разработке биопрепаратов, направленных на повышение урожайности, для биологической защиты и стимуляции роста овса.

Ключевые слова. Овес, *Pantoea pleuroti*, ростостимулирующая активность, антагонистическая активность, фитопатогены, *Fusarium graminearum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Erwinia rhapontici*, *Xanthomonas campestris*

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

Для цитирования: Бородина Е. Е., Гордиенко А. В., Плешивцев И. И., Фотина Н. В., Федорова А. М. и др. Биологический потенциал нового бактериального штамма рода *Pantoea* в защите от биотического стресса и стимуляции роста зерновых культур. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 710–722. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2606

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2606
https://elibrary.ru/NEYDKD

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

New *Pantoea* Strain as Antistress Agent and Growth Stimulator in Grain Growing

Ekaterina E. Borodina[1,*], Andrey V. Gordienko[2], Ivan I. Pleshivtsev[1], Nataliya V. Fotina[1], Anastasiya M. Fedorova[1], Vladimir V. Martirosyan[3]

[1] *Kemerovo State University, Kemerovo, Russia*

[2] *Azot-Agro Ltd, Kemerovo, Russia*

[3] *Scientific Research Institute for the Baking Industry, Moscow, Russia*

Received: 03.07.2025
Revised: 05.09.2025
Accepted: 07.10.2025

**e-mail: kborodina1908@gmail.com*

© E.E. Borodina, A.V. Gordienko, I.I. Pleshivtsev, N.V. Fotina, A.M. Fedorova, V. V. Martirosyan, 2025

Abstract.
Oats (*Avena sativa* L.) is an important agricultural crop. Unfortunately, it is exposed to a wide range of phytopathogenic microorganisms that cause significant yield losses. Aa a result, agricultural science is on the outlook for new effective and sustainable pesticide methods. This research focused on a new bacterial strain of the *Pantoea* genus isolated from grain crops to assess its potential as an antagonist of phytopathogens and a plant growth stimulator.
The strain was isolated from the Maruchak spring oats variety. The taxonomic identification relied on the 16S rRNA gene sequence. The antagonistic activity was assessed against the phytopathogens *Fusarium graminearum* F-877, *Bipolaris sorokiniana* F-529, *Erwinia rhapontici* B-9292, and *Xanthomonas campestris* B-4102. The ability of the strain to produce phytohormones and siderophores was determined spectrophotometrically. The biological nitrogen fixation was assessed using a Rapid N Cube nitrogen analyzer. A set of culture-dependent methods made it possible to measure the zinc, phosphorus, and potassium solubilization activity, as well as the biofilm-forming potential.
The isolated strain was identified as *Pantoea pleuroti*. It exhibited antagonistic activity against the abovementioned phytopathogens. It was especially effective against *F. graminearum* F-877: the inhibition zone was 62 mm (agar block diffusion method) and 12 mm (agar well method). *P. pleuroti* produced such phytohormones as indole-3-acetic acid (5.64 mg/mL), gibberellic acid (284.3 μg/mL), and kinetin (9.46 μg/mL). In addition, it fixed atmospheric nitrogen (680.0 μg/mL), synthesized siderophores (53.1%), formed biofilms, and solubilized phosphates (102.3 μg/mL), potassium, and zinc.
The obtained results confirmed the potential of *P. pleuroti* as part of biofertilizers, bioprotectors, and oat growth stimulators.

Keywords. Oats, *Pantoea pleuroti*, growth-stimulating activity, antagonistic activity, phytopathogen, *Fusarium graminearum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Erwinia rhapontici*, *Xanthomonas campestris*

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 25-16-20076: New Pantoea strains in plant immunity enhancement), Russian Science Foundation (Agreement No. 25-16-20076, April 17, 2025), and the Ministry of Education of Kuzbass (Agreement No. 01/2025, April 10, 2025).

For citation: Borodina EE, Gordienko AV, Pleshivtsev II, Fotina NV, Fedorova AM, *et al.* New *Pantoea* Strain as Antistress Agent and Growth Stimulator in Grain Growing. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):710–722. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2606

Введение

Овес (*Avena sativa* L.) – одна из значимых зерновых культур, широко используемых в пищевой промышленности. Отличаясь высокой питательной ценностью, овес содержит белки, липиды (олеиновую, линолевую и пальмитиновую кислоты), углеводы (преимущественно крахмал), пищевые волокна (*β*-глюкан, арабиноксиланы, целлюлозу), витамины (A, D, E, B12), минералы (кальций, железо, цинк) [1]. Кроме того, в составе овса присутствуют фенольные соединения, включая фенольные кислоты, флавоноиды, авенантрамиды [2]. В связи с растущим интересом к здоровому питанию потребление овса увеличивается. Это обусловлено его благоприятным влиянием на организм человека, например, улучшение пищеварения, снижение уровня холестерина и регуляция уровня глюкозы в крови [3].

Выращивание овса ограничивается биотическими стрессами, особенно воздействием различных заболеваний, вызываемых фитопатогенными грибами,

бактериями и вирусами [4]. Эти заболевания оказывают негативное влияние на количественные и качественные характеристики урожая [5]. Фитопатогены поражают все части растения на протяжении вегетационного периода, приводя к снижению урожайности, ухудшению хлебопекарных свойств зерна, а также накоплению микотоксинов, представляющих угрозу для здоровья человека и животных.

Общее число заболеваний, поражающих зерновые культуры, превышает 200 наименований, около 50 из них приводят к значительным экономическим потерям и характеризуются широким географическим распространением [6–8]. Ежегодные потери урожая вследствие этого оцениваются примерно в 20 %. Среди основных заболеваний овса следует отметить ржавчину, различные типы пятнистости листьев, корневые гнили, головню, бурую ржавчину, септориоз, мучнистую росу, фузариоз колоса, пирикуляриоз, а также ряд вирусных, нематодных и бактериальных инфекций [9–11]. Они способны привести к снижению урожайности или полной гибели растений.

Грибы рода *Fusarium*, в частности высоко агрессивный и широко распространенный вид *Fusarium graminearum*, вызывают фузариоз овса. Это заболевание считается одним из наиболее вредоносных, т. к. оказывает значительное негативное влияние на урожайность и качество зерна [12]. Данный фитопатоген инфицирует колоски овса преимущественно на стадии цветения. Развитие инфекции приводит к нарушению процессов формирования и налива зерна, вызывая преждевременное старение растения и формирование щуплых, легковесных зерен [13].

Фузариоз представляет серьезную угрозу не только с экономической точки зрения, вызывая значительные потери урожая, но и с точки зрения продовольственной безопасности [14]. Грибы *Fusarium* spp. продуцируют широкий спектр микотоксинов – вторичных метаболитов, обладающих токсическим действием на человека и животных [15]. Среди наиболее опасных микотоксинов, ассоциированных с фузариозом, выделяют зеараленон, обладающий эстрогенной активностью, трихотецены и их производные, оказывающие иммуносупрессивное и цитотоксическое действие. Эти микотоксины способны накапливаться в зерне, контаминируя пищевые продукты и корма, что представляет серьезный риск для здоровья человека и животных [16].

Bipolaris sorokiniana – фитопатоген зерновых [17], обладающий широким спектром поражения, включая семена, корневую систему, побеги и листья. В результате инфекции, вызываемой *B. sorokiniana*, у овса развиваются такие заболевания, как черный зародыш семян, обыкновенная корневая гниль и темно-бурая гельминтоспориозная пятнистость листьев [18]. Развитие черного зародыша негативно сказывается на качестве посевного материала, снижает всхожесть и служит первичным источником для развития вышеперечисленных заболеваний [19]. Корневая гниль, развивающаяся в результате заражения через почву или семена, способна привести к существенным потерям урожая зерновых культур. Пятнистость листьев имеет глобальное распространение и также является причиной значительных потерь урожая зерна [20].

Erwinia rhapontici – грамотрицательная бактерия, классифицируемая как условно-фитопатогенная, проявляет вирулентность преимущественно к поврежденным репродуктивным тканям растений, часто в местах повреждений, нанесенных насекомыми семейства *Cecidomyiidae*. Механизм патогенеза *E. rhapontici* обусловлен продукцией пектинолитических ферментов, разрушающих пектиновые вещества клеточных стенок растений, что способствует колонизации тканей хозяина [21]. Инфицирование семян данным фитопатогеном вызывает ряд фенотипических изменений, включая розовую пигментацию, вероятно, связанную с синтезом бактериальных пигментов или изменением метаболизма растения-хозяина, а также морфологическую деформацию (сморщивание) семян вследствие дегидратации и разрушения клеточных структур [22]. Снижение всхожести зараженных семян обусловлено нарушением физиологических процессов прорастания, таких как активация ферментов, мобилизация запасных веществ и развитие зародыша [23]. В результате снижается продуктивность сельскохозяйственных культур. Кроме того, инфицирование *E. rhapontici* негативно влияет на коммерческую ценность семян из-за визуальных дефектов и потенциального ухудшения качества конечного продукта [24]. В частности, такие семена непригодны для производства пищевых продуктов ввиду негативного влияния на органолептические свойства и внешний вид готовой продукции [25].

Фитопатогенная бактерия *Xanthomonas campestris* вызывает черную гниль – заболевание, характеризующееся системным поражением сосудистой системы растений. Проникновение патогена происходит через гидатоды, расположенные по краю листа, или через раны, после чего бактерии колонизируют ксилему, распространяясь по сосудам растения. Системное распространение *X. campestris* приводит к нарушению транспорта воды и питательных веществ, вызывая характерные симптомы заболевания. Начальные стадии инфекции проявляются в виде V-образного хлороза по краю листа, который прогрессирует в некроз. Потемнение жилок листьев, вызванное бактериальной окклюзией сосудов, является диагностическим признаком черной гнили. Дальнейшее развитие заболевания приводит к потемнению сосудистой ткани стебля, общему увяданию растения и, в конечном итоге – к некрозу пораженных тканей. Развитие и тяжесть симптомов зависят от восприимчивости сорта растения, вирулентности штамма патогена и условий окружающей среды [26].

В целях минимизации экономических потерь в сельском хозяйстве, обусловленных негативным влиянием фитопатогенов, необходима разработка и внедрение эффективных стратегий защиты растений.

Несмотря на то что селекция устойчивых сортов растений является важным инструментом, она представляет собой длительный и трудоемкий процесс, занимающий десятилетия [27, 28]. Более того, высокая адаптивность патогенов, обусловленная их способностью к мутациям и генетической рекомбинации, приводит к развитию резистентности к методам контроля, снижая эффективность селекционных стратегий [29].

В связи с этим химические пестициды играют критическую роль в предотвращении потерь урожая, вызванных вспышками заболеваний растений [29, 30]. Однако, растущее использование химических средств защиты растений приводит к ряду негативных последствий, включая загрязнение окружающей среды, формирование резистентности к фунгицидам и бактерицидам у фитопатогенов и нарушение баланса сельскохозяйственных экосистем [31]. Остатки пестицидов, аккумулирующиеся в почве, воде и сельскохозяйственной продукции, представляют собой серьезную экологическую угрозу и потенциальный риск для здоровья человека [32]. Развитие резистентности к фунгицидам и бактерицидам у фитопатогенов, определяемое как наследуемое снижение чувствительности грибов и бактерий к определенным химическим веществам, приводит к потерям урожая, контаминации продукции микотоксинами и, как следствие, угрожает безопасности пищевых продуктов.

Остатки пестицидов не только нарушают биоразнообразие почвы, но и попадают в пищевую цепь через питьевую воду и систему почва-растение, представляя угрозу для здоровья человека [33]. Согласно данным FAO, более 80 распространенных пестицидов обнаружены в воде, воздухе, почве и продуктах питания по всему миру. Потребление пищи, содержащей остатки пестицидов, имеет ряд неблагоприятных последствий для здоровья, включая пищевые отравления, нарушения иммунной и репродуктивной систем, а также повреждение нервной системы. Длительное воздействие пестицидов приводит к развитию хронических заболеваний, таких как рак, диабет, сердечно-сосудистые заболевания и др. [34]. Загрязнение почвы, воды и воздуха остатками пестицидов негативно влияет на окружающую среду, т. к. приводит к сокращению популяций полезных насекомых (например, пчел) и снижению биоразнообразия [35].

На основании этого разработка и внедрение новых, экологически безопасных методов борьбы с фитопатогенами является необходимым условием для обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства и гарантии продовольственной безопасности. Предложенные методы должны быть направлены на снижение зависимости от химических пестицидов и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека. Перспективными направлениями являются методы биологического контроля.

Род *Pantoea* – грамотрицательные бактерии, демонстрирующие антагонистическую активность [36, 37] против ряда фитопатогенов, таких как *Fusarium*, *Alternaria* [38], продуцируя антибиотики, сидерофоры и литические ферменты. Кроме того, данные микроорганизмы способствуют усвоению растениями питательных веществ через фиксацию азота, солюбилизацию фосфатов и продуцирование фитогормонов. Эти свойства делают бактерии рода *Pantoea* перспективным биоконтролирующим агентом и стимулятором роста растений, предлагая альтернативу химическим пестицидам и удобрениям [39].

Цель исследования – изучить характеристики бактериального штамма рода *Pantoea*, выделенного из зерновых культур, для оценки его потенциала в качестве антагониста фитопатогенов и ростостимулятора растений.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлся штамм бактерии, выделенной из семян ярового овса сорта Маручак (рис. 1). Семена предоставлены Кемеровским научно-исследовательским институтом сельского хозяйства – филиалом ФГБУН Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (Кемерово, Россия).

Выделение бактерии из семян ярового овса осуществляли согласно методике, описанной в раннее опубликованной работе [40]. Для стерилизации семена овса обрабатывали 70 % этиловым спиртом (Кемеровская фармацевтическая фабрика, Россия) в течение 3 мин, затем трижды промывали стерильной дистиллированной водой и замачивали в 3 % растворе гипохлорита натрия (ХимКомпонент, Россия; процент активного хлора 2,86 %) с последующей промывкой в дистиллированной воде. Далее 5 г стерилизованных, измельченных семян вносили в 50 мл стерильной воды и выдерживали в шейкере-инкубаторе LSI-3016R (Daihan Labtech, Южная Корея) в течение 2 ч при температуре 30 ± 2 °С, 110 об/мин.

Для получения штаммов микроорганизмов, резистентных к пестицидам, 5 % (от объема питательной среды) полученной ранее суспензии вносили в бульон Луриа-Бертани в модификации Миллера (ЛБм, Диа-М, Россия) с хизалофоп-П-этилом (Лабтех, Россия), метсульфурон-метилом (гербициды, HPC Standards, Германия) по 3 мл/л и имидаклопридом (инсектицид, Оптимум, Россия) по 3 г/л. Культивировали при 30 ± 2 °С, 110 об/мин в течение 48 ч на шейкере-инкубаторе [40].



Рисунок 1. Семена ярового овса сорта Маручак

Figure 1. Spring oats of the Maruchak variety

Для получения штаммов микроорганизмов, устойчивых к солевому стрессу, 5 % (от объема питательной среды) культуральной жидкости, полученной на питательной среде с пестицидами, вносили в бульон ЛБм с добавлением 6 г/л хлорида натрия (Ленреактив, Россия). Культивировали в условиях, описанных ранее [40].

Для получения штаммов, способных выживать на бедных почвах, 5 % (от объема питательной среды) культуральной жидкости, полученной на питательной среде с высоким содержанием соли, вносили в жидкую среду Difco M9 minimal salts, ×5 (Le Pont de Claix, Франция). Культивировали в условиях, описанных в исследовании [40].

Для получения чистых культур 1 мл полученной суспензии высевали на чашку Петри в агаризованную среду ЛБм глубинным способом. Культивировали при температуре 30 ± 2 °С в течение 24 ч в термостате ТСО-1/80 СПУ (Смоленское специальное конструкторско-технологическое бюро систем программного управления, Россия). Затем полученные колонии высевали на агаризованную среду ЛБм методом истощающего штриха. Данный посев осуществляли в трехкратной повторности. Чистоту выделенных штаммов бактерий контролировали микроскопически [41].

Для изучения культуральных признаков штаммов (цвет, форма, край, профиль, оптические свойства поверхности и размер колоний) производили посев методом истощающего штриха на агаризованную среду ЛБм. Культивировали при температуре 30 ± 2 °С в течение 24 ч [41].

Для определения морфологических признаков фиксированный мазок окрашивали метиленовым голубым и микроскопировали с объективом ×100. Проводили окраску по методу Грама с помощью КОН-теста для определения биохимических свойств клеточной стенки бактерий [41].

Идентификацию выделенных бактерий проводили с помощью автоматического микробиологического анализатора Vitek 2 Compact (BioMerieux, Франция) с использованием карт ID-GN (грамотрицательные микроорганизмы, Химмед, Россия). Бактериальные культуры выращивали на агаризованной питательной среде – колумбийском агаре с кровью (BioVitrum, Швеция), в течение 48 ч при температуре 30 ± 2 °С, затем готовили суспензию штаммов в 2 мл дистиллированной воды до оптической плотности 2,70–3,30 по шкале МакФарланда с помощью денситометра Densichek plus (BioMerieux, Франция) [42].

Определение видовой принадлежности бактериального изолята осуществляли путем секвенирования гена 16S рРНК при помощи праймеров 16S_27F (AGAGTTTGATCMTGGCTCAG) [43] и 16S_1492R (GGTTACCTTGTTACGACTT) [44] на амплификаторе ДНК Verity (Applied Biosystems, США). Полученный продукт ПЦР секвенировали по Сэнгеру с помощью тех же праймеров 16S_27F и 16S_1492R. Капиллярный электрофорез проводили на генетическом анализаторе ABI 3130xl (Applied Biosystems, США). Поиск наиболее близкого гомолога проводила компания Blast [45], в своих исследованиях взяв за основу базу данных NCBI Reference Sequence Database for Prokaryotes.

Для анализа антагонистической активности в отношении фитопатогенных грибов и бактерий использовали следующие штаммы фитопатогенов, полученные из Национального биоресурсного центра Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов Национального исследовательского центра Курчатовского института (Россия): *Fusarium graminearum* F-877, *Bipolaris sorokiniana* F-529, *Erwinia rhapontici* B-9292 и *Xanthomonas campestris* B-4102.

Анализ антагонистической активности в отношении фитопатогенных грибов и бактерий проводили методом диффузии из агарового блока [22]. Фитопатогенные грибы культивировали в пробирке на картофельно-декстрозном агаре (Диа-М, Россия), а бактерии – на ГМФ-агаре (Ленреактив, Россия). Суточную культуру исследуемой бактерии, выращенной на жидкой питательной среде ЛБм, засевали в чашки Петри глубинным способом на агаризованную среду и инкубировали в течение 24 ч при температуре 30 ± 2 °С. Затем вырезали агаровый блок диаметром 6 мм с исследуемой культурой и вставляли его в лунку агарового диска другой чашки Петри диаметром 6 мм с засеянными фитопатогенами. Фитопатоген засевали поверхностно, используя смывы со скошенного агара. Посев суспензии мутностью 0,8 по Мак-Фарланду ($1{,}5\times10^8$ КОЕ/см^3) осуществляли «газоном». Чашки Петри выдерживали в течение 8 ч в холодильнике при температуре 4 °С для диффузии метаболитов монокультур бактерии из блока в толщу агара с тест-культурой, а затем инкубировали в термостате при 26 ± 2 °С в течение 5 суток (для грибов) и 24 ч (для бактерий). Результатом исследования являлся диаметр зоны ингибирования роста фитопатогена.

Для анализа антагонистической активности в отношении фитопатогенных грибов и бактерий использовали метод лунок [46]. Подготовку и посев фитопатогенных грибов и бактерий осуществляли по методике, описанной в анализе методом диффузии из агарового блока. Готовили суспензию исследуемого штамма до оптической плотности 0,8–1,0 по шкале МакФарланда на пептонной воде, 1 мл полученной суспензии добавляли в 10 мл бульона ЛБм. Культивировали в течение 24 ч при температуре 30 ± 2 °С и скорости вращения 110 об/мин. Далее отделяли клетки от культуральной жидкости при помощи центрифугирования в течение 10 мин и при скорости вращения 8000 об/мин. Вырезали лунку диаметром 6 мм агарового диска чашки Петри с засеянными фитопатогенами и вносили 300 мкл бесклеточной культуральной жидкости исследуемого штамма. Культивировали в условиях, описанных в анализе методом диффузии из агарового блока. Результатом исследования являлся диаметр зоны ингибирования роста фитопатогена.

Для анализа способности штамма к синтезу сидерофоров, индолил-3-уксусной и гиббереллиновой кислот готовили бесклеточную культуральную жидкость исследуемого бактериального штамма согласно методике, указанной в анализе антагонистической активности методом лунок.

Для определения способности штамма к синтезу сидерофоров к бесклеточной культуральной жидкости добавляли свежеприготовленный реагент Chorme Azurol S (1,5 мл 0,016 % раствора железа III хлористого 6-водного (ЛенРеактив, Россия) в 10 М растворе соляной кислоты необходимо смешать с 7,5 мл 1,21 % раствора хромазурола S (Chem-ex, Россия); доводили общий объем раствора дистиллированной водой до 100 мл) в соотношении 1:1. Полученный раствор выдерживали в течение 20 мин при температуре 22 ± 2 °С. Оптическую плотность определяли спектрофотометрически при длине волны 630 нм. Одновременно в тех же условиях проводили контрольный опыт, в качестве контроля использовали питательную среду [47]. Концентрацию сидерофоров ($C_{сид}$, %) определяли по формуле (1):

$$C_{сид} = \frac{A_о - A_к}{A_к} \quad (1)$$

где $A_о$ – оптическая плотность опытного образца; $A_к$ – оптическая плотность контрольного образца.

Для определения способности штамма синтезировать индолил-3-уксусную кислоту к бесклеточной культуральной жидкости добавляли реактив Сальковского в соотношении 1:1. Выдерживали при температуре 22 ± 2 °С в течение 30 мин. Оптическую плотность раствора определяли спектрофотометрически при длине волны 535 нм. Одновременно в тех же условиях проводили контрольный опыт, в качестве контроля использовали питательную среду [48]. Оптическую плотность образца (ОП) определяли по формуле (2):

$$ОП = ОП_п + ОП_к \quad (2)$$

где $ОП_п$ – оптическая плотность опытного образца по показаниям прибора; $ОП_к$ – оптическая плотность контроля.

Количество индолил-3-уксусной кислоты фиксировали по градуировочному графику ее стандартных растворов (Диа-М, Россия) с концентрациями от 0,5 до 5,0 мкг/мл.

Для определения способности штамма к синтезу гиббереллиновой кислоты к 1 мл бесклеточной культуральной жидкости добавляли по 140 мкл 1 М раствора цинка уксуснокислого 2-водного (Ленреактив, Россия) и 10,6 % раствора калия железистосинеродистого 3-водного (ChemExpress, Россия) в соотношении 100:14:14 соответственно, энергично встряхивали. Далее центрифугировали в течение 15 мин при 4500 об/мин. Полученный супернатант смешивали с 30 % соляной кислотой (ChemExpress, Россия) в соотношении 1:1 и выдерживали при температуре 22 ± 2 °С в течение 75 мин. Оптическую плотность измеряли по отношению к 5 % соляной кислоте на спектрофотометре UV 1800 (Shimadzu, Япония) при длине волны 254 нм. Количество синтезируемой гиббереллиновой кислоты определяли по калибровочному графику ее стандартного раствора (Диа-М, Россия) в пределах от 200 до 1200 мкг/мл [49].

Для определения способности к синтезу кинетина готовили суспензию исследуемого штамма по методике, описанной в анализе антагонистической активности методом лунок. Далее 1 мл суспензии добавляли к 10 мл жидкой среды следующего состава, г/л: 56,4 Difco M9 minimal salts, ×5; 2,0 казаминокислоты (Диа-М, Россия); 0,1 тиамина (Химреактив, Россия); 2,0 мкг биотина (Лабтех, Россия). Культивировали в течение 48 ч при температуре 30 ± 2 °С и 110 об/мин. Отделение клеток от культуральной жидкости осуществляли по методике, описанной в анализе антагонистической активности методом лунок. Определение оптической плотности проводили на спектрофотометре при длине волны 665 нм, в качестве раствора сравнения использовали питательную среду. Количество синтезируемого кинетина определяли по калибровочному графику его стандартного раствора (Химмед, Россия) в пределах от 5 до 100 мкг/мл [50].

Для определения способности штамма фиксировать азот готовили суспензию штамма по методике, описанной в анализе антагонистической активности методом лунок на бульоне Эшби с глюкозой (HiMedia Laboratories, Индия). Культивировали при температуре 30 ± 2 °С и скорости вращения 110 об/мин в течение 48 ч. Для отделения клеток культуральную жидкость центрифугировали при 8000 об/мин в течение 15 мин. Количество азота в бесклеточной культуральной жидкости определяли при помощи анализатора азота Rapid N Cube (Elementar, Германия) [51].

Для определения способности солюбилизировать фосфор готовили суспензию штамма по методике, описанной в анализе антагонистической активности методом лунок на бульоне Пиковской (HiMedia Laboratories, Индия). Культивировали и отделяли клетки от культуральной жидкости в условиях, описанных в определении способности фиксировать азот. Далее к бесклеточной культуральной жидкости добавляли раствор хлормолибденовой кислоты (1,5 г аммония молибденовокислого (ChemExpress, Россия), растворенного в 40 мл дистиллированной воды, с добавлением 34,2 мл концентрированной соляной кислоты и доведением общего объема дистиллированной водой до 100 мл) и раствор хлороловянистой кислоты (2,5 г олова хлористого (ПрофСнаб, Россия) растворяли в 10 мл концентрированной соляной кислоты, доводили общий объем дистиллированной водой до 100 мл) в соотношении 50:225:1 соответственно. Выдерживали полученный раствор при температуре 22 ± 2 °С в течение 15 мин. Оптическую плотность определяли

при длине волны 600 нм. Одновременно в тех же условиях проводили контрольный опыт, в качестве контроля использовали питательную среду. Оптическую плотность образца определяли по формуле (2). Количество растворенного фосфора устанавливали по калибровочному графику стандартного раствора калия фосфорнокислого 2-замещенного (ЛенРеактив, Россия) в пределах от 50 до 300 мкг/мл [52].

Для определения способности к солюбилизации калия осуществляли точечный посев штамма в чашки Петри со средой Александрова. Культивировали в термостате течение 4 суток при температуре 30 ± 2 °С. После культивирования измеряли гало-зону [53].

Для определения способности к солюбилизации цинка осуществляли точечный посев штамма в чашки Петри со средой следующего состава, г/л: 10,0 глюкозы (ChemExpress, Россия); 1,0 аммония сернокислого (Диа-М, Россия); 0,2 калия хлористого (ЛенРеактив, Россия); 0,1 калия фосфорнокислого 2-замещенного (Ленреактив, Россия); 0,2 магния сернокислого (ChemExpress, Россия); 1,0 цинка окиси (ЛенРеактив, Россия); 15,0 агар-агара. Культивировали в условиях, описанных в определении способности солюбилизировать калий. После культивирования измеряли гало-зону [54].

Для определения способности к продуцированию биопленок осуществляли посев штамма штрихом в чашки Петри со средой следующего состава, г/л: 0,8 конго красного (Диа-М, Россия); 50,0 сахарозы (ChemExpress, Россия); 37,0 бульона с сердечно-мозговым экстрактом (Микро-Лаб, Россия); 15,0 агар-агара. Культивировали в условиях, описанных в определении способности солюбилизировать калий. Наличием способности к продуцированию биопленок считалось почернение выросшей культуры [52].

Каждое исследование проводилось в трехкратной повторности. Результаты представлены как среднее значение трех измерений со стандартным отклонением. Анализ статистических данных осуществляли при помощи программы Microsoft Office Excel 2007.

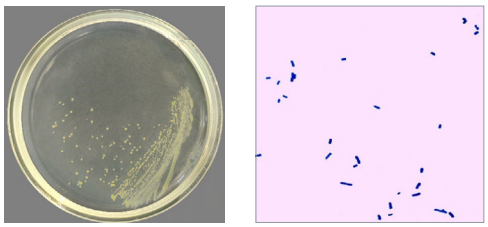
Результаты и их обсуждение

Культурально-морфологические признаки выделенной бактерии представлены на рисунке 2.

Выделенная бактерия образовывала круглые колонии желтого цвета диаметром в среднем 1 мм с приподнятым профилем, ровным краем и глянцевой фактурой. По морфологическим признакам бактерия относится к грамотрицательным бациллам со средним размером 0,716×0,352 мкм.

По результатам анализа биохимических признаков определено, что штамм ферментирует адонитол, L-пирролидониларилами дазу, *β*-галактозидазу, D-глюкозу, D-маннитол, D-маннозу, D-сорбит, сахарозу, D-трегалозу, малонат, 5-кето-D-глюконат, *β*-N-ацетилгалактозаминидазу, фосфатазу, кумарат.

Молекулярно-генетическая идентификация показала, что бактериальный штамм с 98 % вероятностью –



a b

Рисунок 2. Культурально-морфологические признаки выделенной бактерии: a – рост штамма в чашке Петри на агаризованной среде ЛБм; b – микроскопия фиксированного мазка, окрашенного метиленовым голубым, при увеличении ×1000

Figure 2. Cultural and morphological profile of *Pantoea pleuroti*: a – in a Petri dish on Lysogeny broth agar medium; b – microscopy of fixed smear stained with methylene blue, ×1,000

Pantoea pleuroti, в коллекции Национального центра биоресурсов Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов Национального исследовательского центра Курчатовского института присвоен номер B-14756.

Последовательности генов, кодирующих 16S рРНК *P. pleuroti*: CCCCCCTCCTACGAGACTCAAGCCTGC CAGTTTCAAATGCAGTTCCCAGGTTAAGCCCGGG GATTTCACATCTGACTTAACAGACCGCCTGCGTG CGCTTTACGCCCAGTAATTCCGATTAACGCTTGC ACCCTCCGTATTACCGCGGCTGCTGGCACGGAGT TAGCCGGTGCTTCTTCTGCGGGTAACGTCAATCA CTGCGGTTATTAACCACAATGCCTTCCTCCCCGC TGAAAGTACTTTACAACCCGAAGGCCTTCTTCAT ACACGCGGCATGGCTGCATCAGGCTTGCGCCCAT TGTGCAATATTCCCCACTGCTGCCTCCCGTAGGA GTCTGGACCGTGTCTCAGTTCCAGTGTGGCTGGT CATCCTCTCAGACCAGCTAGGGATCGTCGCCTAG GTGGGCCGTTACCCCGCCTACTAGCTAATCCCAT CTGGGTTCATCCGATAGTGAGAGGCCCTAAGGTC CCCCTCTTTGGTCTTGCGACGTTATGCGGTATTAG CCACCGTTTCCAGTGGTTATCCCCCTCTATCGGG CAGATCCCCAGACATTACTCACCCGTCCGCCACT CGTCACCCGAGAGCAAGCTCTCTGTGCTACCGTC CGACTTGCATGTGTTAGGCCTGCCGCCAGCGTTC AATCTGAGCCAGGATCAAACTCT.

Результаты определения антагонистической активности представлены на рисунке 3 и в таблице 1.

P. pleuroti проявлял антагонистическую активность в отношении всех исследуемых фитопатогенов. Однако при анализе методом лунок антагонистическая активность в отношении *Bipolaris sorokiniana* F-529 не обнаружили. При этом анализ методом диффузии из агарового блока выявил наибольшую активность в отношении *B. sorokiniana* F-529, что может быть связано с активным ростом *P. pleuroti* на питательной среде. Таким образом, подавление роста фитопатогена шло благодаря конкуренции за питательные вещества. Высокая активность наблюдалась в отношении

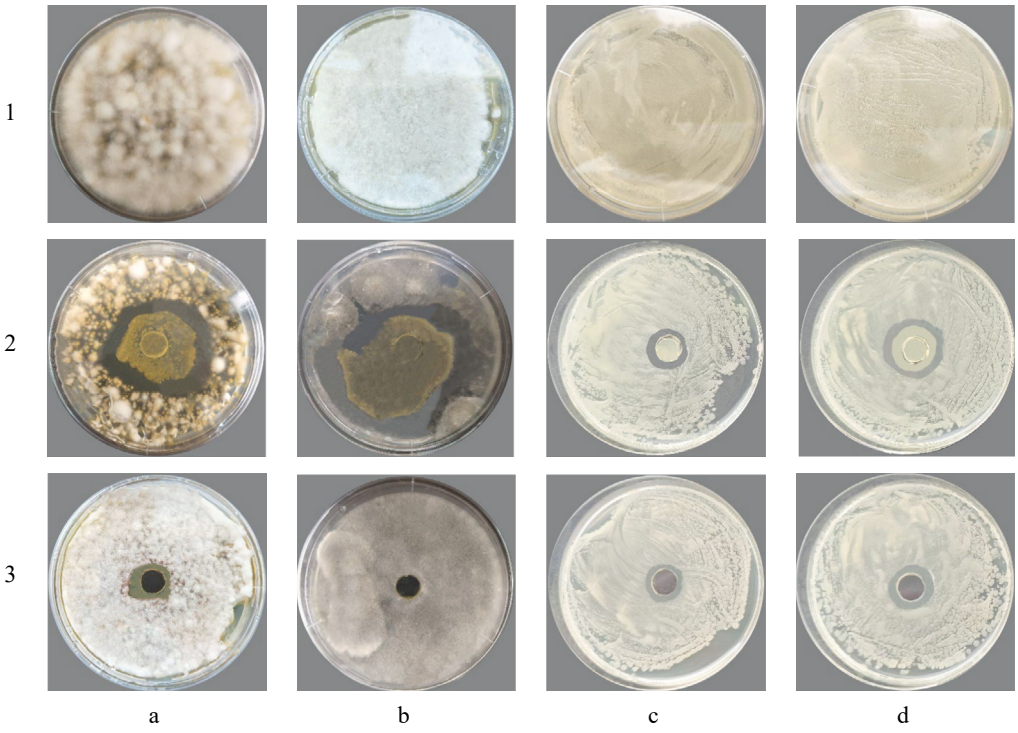


Рисунок 3. Антагонистическая активность *Pantoea pleuroti*: a – *Fusarium graminearum* F-877; b – *Bipolaris sorokiniana* F-529; c – *Erwinia rhapontici* B-9292; d – *Xanthomonas campestris* B-4102; 1 – контроль; 2 – метод диффузии из агарового блока; 3 – метод лунок

Figure 3. Antagonistic profile of *Pantoea pleuroti*: a – *Fusarium graminearum* F-877; b – *Bipolaris sorokiniana* F-529; c – *Erwinia rhapontici* B 9292; d – *Xanthomonas campestris* B-4102; 1 – control; 2 – agar block diffusion method; 3 – agar well method

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

Table 1. Antagonistic activity of *Pantoea pleuroti* against phytopathogens

Фитопатоген	Средний диаметр зоны подавления роста, мм
Метод диффузии из агарового блока	
Fusarium graminearum F-877	62 ± 2
Bipolaris sorokiniana F-529	80 ± 3
Erwinia rhapontici B-9292	16 ± 1
Xanthomonas campestris B-4102	25 ± 1
Метод лунок	
Fusarium graminearum F-877	12 ± 1
Bipolaris sorokiniana F-529	–
Erwinia rhapontici B-9292	15 ± 1
Xanthomonas campestris B-4102	20 ± 1

Fusarium graminearum F-877 (62 мм); низкая активность – в отношении фитопатогенных бактерий. Таким образом, можно предположить, что такие результаты обосновываются тем, что *P. pleuroti* продуцирует меньшее количество метаболитов, которые проявляют в большей степени антибактериальную природу, чем антифунгальную.

Результаты ростостимулирующей активности выделенного штамма представлены на рисунке 4 и в таблице 2. *P. pleuroti* способен продуцировать фитогормоны, фиксировать азот, солюбилизировать фосфаты, калий и цинк, а также образовывать биопленки.

Настоящее исследование подтверждает и расширяет имеющиеся данные о потенциале бактерий рода *Pantoea* в качестве стимуляторов роста растений и агентов биоконтроля. Антагонистическая активность *P. pleuroti* в отношении фитопатогенных грибов рода *Fusarium*, выявленная в работе, согласуется с данными Suleimanova *et al.* [55] для *P. brenneri* и Herrera *et al*. [56] для *Pantoea agglomerans* в отношении *F. graminearum*. В исследовании Walterson *et al.* [57] продемонстрировано антимикробное действие *P. agglomerans* в отношении *Xanthomonas campestris* и *Erwinia amylovora*.

Способность исследуемого штамма *P. pleuroti* продуцировать сидерофоры (53,1 %) сопоставима с результатами Herrera *et al*. [56]. Ansari *et al*. [58] получили данные о возможности продуцировать сидерофоры для *P. agglomerans*. Guardiola-Márquez *et al*. [59] также наблюдали продукцию сидерофоров (2 мм гало-зона) у штамма *P. pleuroti*. Такие различия могут объясняться как штаммовой специфичностью, так и применением различных методик количественной оценки сидерофоров. Аналогично, продукция индолил-3-уксусной



a b c

Рисунок 4. Ростостимулирующая активность *Pantoea pleuroti*: a – способность солюбилизировать калий; b – способность солюбилизировать цинк; c – способность образовывать биопленки

Figure 4. Growth-promoting activity of *Pantoea pleuroti* as solubilizer of potassium (a) and zinc (b); and biofilm-forming capacity (c)

Таблица 2. Результаты определения ростостимулирующей активности *Pantoea pleuroti*

Table 2. Growth-promoting activity of *Pantoea pleuroti*

Показатель	Значение
Сидерофоры, %	53,1 ± 1,9
Индолил-3-уксусная кислота, мг/мл	5,64 ± 0,16
Гиббереллиновая кислота, мкг/мл	284,3 ± 10,2
Кинетин, мкг/мл	9,46 ± 0,27
Содержание азота в культуральной жидкости, мкг/мл	680,0 ± 20,0
Содержание растворимого фосфора, мкг/мл	102,3 ± 4,3
Способность солюбилизировать калий, мм	+
Способность солюбилизировать цинк, мм	+
Способность образовывать биопленки	+

кислоты выленным штаммом (5,64 мг/мл) значительно выше данных, полученных Guardiola-Márquez *et al*. [59] (0,0558 мг/мл) и Ansari *et al*. [58] (0,0986 мг/мл) для *P. agglomerans*. Присутствующие различия могут быть обусловлены как генетическими особенностями штаммов, так и различиями в составе питательных сред и условиях культивирования, а также различиями в методах определения.

Солюбилизация фосфора штаммом (102,3 мкг/мл) несколько ниже значений Ansari *et al*. [58] (119,19 и 120,32 мкг/мл) для *P. agglomerans*. Исследователи в [59] также отмечают способность *Pantoea* растворять фосфаты (3 мм гало-зона). Различия в значениях могут быть связаны с использованием нескольких источников фосфора и методов его определения. Способность штамма солюбилизировать калий согласуется с данными Bakhshandeh *et al*. [60] для *Pantoea ananatis* и Guardiola-Márquez *et al*. [59] (5 мм гало-зона) для *P. pleuroti*. В отличие от Choudhary *et al*. [61], которые показали высокую солюбилизацию цинка *Pantoea eucrina*, Guardiola-Márquez *et al*. [59] не наблюдали растворения цинка исследуемым штаммом. Это подчеркивает видоспецифичность данного признака.

Продукция гиббереллиновой кислоты выделенным штаммом (284,3 мкг/мл) находилась в диапазоне от 288,5 ± 16,8 до 331,1 ± 19,2 мкг/мл для *P. ananatis, Pantoea citrea* и *Pantoea dispersa*, который определил Yun *et al*. [62]. Способность к фиксации азота (680 мкг/мл) согласуется с наблюдениями Guardiola-Márquez *et al*. [59] (7 мм гало-зона), продукция кинетина (9,46 мкг/мл) и образование биопленок расширяют представления о физиологических возможностях *Pantoea* и их потенциальной роли в стимуляции роста растений. Отсутствие азотфиксации у штамма *P. agglomerans*, исследованного Herrera *et al*. [56], свидетельствует о внутривидовой гетерогенности этого признака.

Таким образом, исследование вносит вклад в понимание профиля ростостимулирующей активности *Pantoea*. Полученные данные подтверждают перспективность использования *Pantoea* в качестве биоудобрений и агентов биоконтроля.

Выводы

Обеспечение фитосанитарного благополучия посевов овса – комплексная проблема, требующая многостороннего и научно обоснованного подхода. Успешная защита от фитопатогенов основывается на постоянном совершенствовании методов борьбы с акцентом на экологическую безопасность и устойчивость агроэкосистем. Внедрение биологических методов защиты растений способствует развитию устойчивого сельского хозяйства, снижая негативное воздействие химических пестицидов на окружающую среду и обеспечивая производство безопасной сельскохозяйственной продукции.

Исследование продемонстрировало значительный потенциал бактериального штамма рода *Pantoea* в борьбе с фитопатогенами и стимулировании роста растений. Выделенный штамм обладает широкой антимикробной активностью, подавляя рост патогенных грибов (*Fusarium graminearum* F-877, *Bipolaris sorokiniana* F-529) и бактерий (*Erwinia rhapontici* B-9292 и *Xanthomonas campestris* B-4102). Помимо этого, штамм демонстрирует важные ростостимулирующие свойства, включая синтез фитогормонов, фиксацию азота, солюбилизацию фосфатов, калия и цинка, а также образование биопленок.

Эти характеристики делают штамм перспективным для разработки средств биологической защиты

растений. Биологическое разнообразие микроорганизмов, включая представителей рода *Pantoea*, открывает новые возможности для устойчивого земледелия, позволяющего минимизировать зависимость от химических пестицидов и удобрений, одновременно обеспечивая высокие урожаи и безопасность пищевой продукции.

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 plagiarism.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Tang Y, Li S, Yan J, Peng Y, Weng W, *et al*. Bioactive components and health functions of oat. Food Reviews International. 2023;39(7):4545–4564. https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2029477

2. Kim I-S, Hwang C-W, Yang W-S, Kim C-H. Multiple antioxidative and bioactive molecules of oats (*Avena sativa* L.) in human health. Antioxidants. 2021;10(9):1454. https://doi.org/10.3390/antiox10091454

3. Lin H, Fei T, Liu X, Lin X, Wang L. Oat (*Avena sativa* L.) fermented by GRAS-grade microorganisms: From improvement of the quality properity and health benefits, safety assessment to potential industrial applications. Trends in Food Science & Technology. 2025;160:105020. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105020

4. Sharma R, Kukreja V. Image segmentation, classification and recognition methods for comics: A decade systematic literature review. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2024;131:107715. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107715

5. Zhang K, Ma L, Cui B, Li X, Zhang B, *et al*. Visual large language model for wheat disease diagnosis in the wild. Computers and Electronics in Agriculture. 2024;227(Part 1):109587. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109587

6. Jarroudi ME, Kouadio L, Bock CH, Junk J, Pasquali M, *et al*. A threshold-based weather model for predicting stripe rust infection in winter wheat. Plant Disease. 2017;101(5):693–703. https://doi.org/10.1094/PDIS-12-16-1766-RE

7. Riaz A, Athiyannan N, Periyannan S, Afanasenko O, Mitrofanova O, *et al*. Mining vavilov's treasure chest of wheat diversity for adult plant resistance to Puccinia triticina. Plant Disease. 2017;101(2):317–323. https://doi.org/10.1094/PDIS-05-16-0614-RE

8. Sharma VK, Niwas R, Karwasra SS, Saharan MS. Progression of powdery mildew on different varieties of wheat and triticale in relation to environmental conditions. Journal of Agrometeorology. 2017;19(1):84–87. https://doi.org/10.54386/jam.v19i1.764

9. Al-Sadi AM. Epidemiology and management of fungal diseases in dry environments. Innovations in Dryland Agriculture. 2016;187–209. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47928-6_7

10. Aboukhaddour R, Fetch T, McCallum BD, Harding MW, Beres BL, *et al*. Wheat diseases on the prairies: A Canadian story. Plant Pathology. 2020;69(3):418–432. https://doi.org/10.1111/ppa.13147

11. Gultyaeva E, Yusov V, Rosova M, Mal'chikov P, Shaydayuk E, *et al*. Evaluation of resistance of spring durum wheat germplasm from Russia and Kazakhstan to fungal foliar pathogens. Cereal Research Communications. 2020;48:71–79. https://doi.org/10.1007/s42976-019-00009-9

12. Zhang Y, Xiao H, Poms RE, Li Q, Zhao R. Antifungal activity and potential mechanism of paeonol against *Fusarium graminearum* and the application on wheat grains and steamed bread. Grain & Oil Science and Technology. 2025;8(2):109–117. https://doi.org/10.1016/j.gaost.2025.02.001

13. Al-Hashimi A, Aina O, Daniel AI, Du Plessis M, Keyster M, *et al*. Critical review on characterization, management, and challenges of fusarium head blight disease in wheat. Physiological and Molecular Plant Pathology. 2025;136:102557. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102557

14. Shuai J, Tu Q, Zhang Y, Xia X, Wang Y, *et al*. Silence of five *F. graminearum* genes in wheat host confers resistance to Fusarium head blight. Journal of Integrative Agriculture. 2024. https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.04.026

15. Martínez M, Ramírez Albuquerque L, Arata AF, Biganzoli F, Fernández Pinto V, *et al*. Effects of *Fusarium graminearum* and *Fusarium poae* on disease parameters, grain quality and mycotoxins contamination in bread wheat (Part I). Journal of the Science of Food and Agriculture. 2020;100(2):863–873. https://doi.org/10.1002/jsfa.10099

16. Pedrero-Méndez A, Cesarini M, Mendoza-Salido D, Petrucci A, Sarrocco S, *et al*. Trichoderma strain-dependent direct and indirect biocontrol of Fusarium head blight caused by *Fusarium graminearum* in wheat. Microbiological Research. 2025;296:128153. https://doi.org/10.1016/j.micres.2025.128153

17. Tiwari M, Singh P. Bolstering wheat's immunity: BABA-mediated defense priming against *Bipolaris sorokiniana* amid competition. Physiological and Molecular Plant Pathology. 2024;133:102372. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102372

18. Al-Sadi AM. *Bipolaris sorokiniana*-induced black point, common root rot, and spot blotch diseases of wheat: A review. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology. 2021;11:584899. https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.584899

19. Villa-Rodriguez E, Lugo-Enríquez C, Ferguson S, Parra-Cota FI, Cira-Chávez L, *et al*. *Trichoderma harzianum sensu lato* TSM39: A wheat microbiome fungus that mitigates spot blotch disease of wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*) caused by *Bipolaris sorokiniana*. Biological Control. 2022;175:105055. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105055

20. Kumar J, Schäfer P, Hückelhoven R, Langen G, Baltruschat H, *et al*. *Bipolaris sorokiniana*, a cereal pathogen of global concern: Cytological and molecular approaches towards better control. Molecular Plant Pathology. 2002;3(4):185–195. https://doi.org/10.1046/j.1364-3703.2002.00120.x

21. Huang HC, Erickson RS, Yanke LJ, Hsieh TF, Morrall RAA. First report of pink seed of lentil and chickpea caused by *Erwinia rhapontici* in Canada. Plant Disease. 2003;87(11):1398. https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.11.1398A

22. Serazetdinova YR, Chekushkina DYu, Borodina EE, Kolpakova DE, Minina VI, *et al*. Synergistic interaction between *Azotobacter* and *Pseudomonas* bacteria in a growth-stimulating consortium. Foods and Raw Materials. 2025;13(2):376–393. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-2-651

23. Hsieh TF, Huang HC, Erickso RS. Spread of seed-borne *Erwinia rhapontici* in bean, pea and wheat. European Journal of Plant Pathology. 2010;127:579–584. https://doi.org/10.1007/s10658-010-9622-0

24. Elmer W, Indermaur EJ, Smart C. Diseases of rhubarb. In: Elmer WH, McGrath M, McGovern RJ, editors. Handbook of Vegetable and Herb Diseases. Cham: Springer; 2025. pp. 1–33. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35512-8_49-1

25. Tambong JT. Bacterial pathogens of wheat: Symptoms, distribution, identification, and taxonomy. Wheat – Recent Advances. 2022:1–24. https://doi.org/10.5772/intechopen.102855

26. Soengas P, Hand P, Vicente JG, Pole JM, Pink DA. Identification of quantitative trait loci for resistance to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in *Brassica rapa*. Theoretical and Applied Genetics. 2007;114(4):637–645. https://doi.org/10.1007/s00122-006-0464-2

27. Rahmanzadeh A, Khahani B, Taghavi SM, *et al*. Genome-wide meta-QTL analyses provide novel insight into disease resistance repertoires in common bean. BMC Genomics. 2022;23(1):680. https://doi.org/10.1186/s12864-022-08914-w

28. Khojasteh M, Darzi Ramandi H, Taghavi SM, Taheri A, Rahmanzadeh A, *et al*. Unraveling the genetic basis of quantitative resistance to diseases in tomato: A meta-QTL analysis and mining of transcript profiles. Plant Cell Reports. 2024;43(7):184. https://doi.org/10.1007/s00299-024-03268-x

29. Yang R, Du X, Khojasteh M, Shah SMA, Peng Y, *et al*. Green guardians: The biocontrol potential of *Pseudomonas*-derived metabolites for sustainable agriculture. Biological Control. 2025;201:105699. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2025.105699

30. Intisar A, Ramzan A, Sawaira T, Kareem AT, Hussain N, *et al*. Occurrence, toxic effects, and mitigation of pesticides as emerging environmental pollutants using robust nanomaterials – A review. Chemosphere. 2022;293:133538. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133538

31. Khan BA, Nadeem MA, Nawaz H, Amin MM, Abbasi GH, *et al*. Pesticides: Impacts on agriculture productivity, environment, and management strategies. In: Aftab T, editor. Emerging Contaminants and Plants. Cham: Springer; 2023. pp. 109–134. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22269-6_5

32. Naidu R, Biswas B, Willett IR, Cribb J, Kumar SB, *et al*. Chemical pollution: A growing peril and potential catastrophic risk to humanity. Environment International. 2021;156:106616. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106616

33. Ali S, Ullah MI, Sajjad A, Shakeel Q, Hussain A. Environmental and health effects of pesticide residues. In: Inamuddin, Ahamed MI, Lichtfouse E, editors. Sustainable Agriculture Reviews 48. Cham: Springer; 2021;48:311–366. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54719-6_8

34. Rani L, Thapa K, Kanojia N, Sharma N, Singh S, *et al*. An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. Journal of Cleaner Production. 2021;283:124657. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657

35. Yu Z, Lu T, Qian H. Pesticide interference and additional effects on plant microbiomes. Science of The Total Environment. 2023;888:164149. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164149

36. Kirk A, Davidson E, Stavrinides J. The expanding antimicrobial diversity of the genus *Pantoea*. Microbiological Research. 2024;289:127923. https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127923

37. Xu W, Wang F, Zhang M, Ou T, Wang R, *et al*. Diversity of cultivable endophytic bacteria in mulberry and their potential for antimicrobial and plant growth-promoting activities. Microbiological Research. 2019;229:126328. https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126328

38. 濮阳市台前县樱桃叶斑病菌的鉴定及其拮抗菌的筛选. 江晓颐, 李永, 薛寒, 姜宁, 常聚普, *et al*. 陆地生态系统与保护学报. 2025;5(1):65–71. [Jiang X, Li Y, Xue H, Jiang N, Chang J, *et al*. Identification of cherry leaf spot disease in taiqian county, puyang city, and screening of its antagonistic bacteria[J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation. 2025;5(1):65–71. (In Chinese)] https://doi.org/10.12356/j.2096-8884.2025-0001

39. Matera A, Warchoł M, Simlat M. Effect of the *Pantoea vagans* strain SRS89 on carrot (*Daucus carota* subsp. *sativus* L.) seed germination and plant growth under saline conditions. South African Journal of Botany. 2025;180:415–427. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2025.03.033

40. Фасхутдинова Е. Р., Богачева Н. Н., Бородина Е. Е., Позднякова А. В., Лузянин С. Л. Применение эндофитных микроорганизмов для интенсификации ростовых процессов сельскохозяйственных культур. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 4. С. 820–836. [Faskhutdinova ER, Bogacheva NN, Borodina EE, Pozdnyakova AV, Luzyanin SL. Effect of endophytic microorganisms on growth rate of crops. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(4):820–836. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2548

41. Asyakina LK, Vorob'eva EE, Proskuryakova LA, Zharko MYu. Evaluating extremophilic microorganisms in industrial regions. Foods and Raw Materials. 2023;11(1):162–171. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-556

42. Милентьева И. С., Фотина Н. В., Жарко М. Ю., Проскурякова Л. А. Перспективы использования микробных препаратов для снижения окислительного стресса сельскохозяйственных растений. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 4. С. 750–761. [Milentyeva IS, Fotina NV, Zharko MYu, Proskuryakova LA. Microbial treatment and oxidative stress in agricultural plants. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(4):750–761. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2403

43. Lane DJ. 16S/23S rRNA sequencing. In: Stackebrandt E, Goodfellow M, editors. Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics. NY: John Wiley & Sons; 1991. pp. 115–175.

44. Turner S, Pryer KM, Miao VP, Palmer JD. Investigating deep phylogenetic relationships among cyanobacteria and plastids by small subunit rRNA sequence analysis. Journal of Eukaryotic Microbiology. 1999:46(4);327–338. https://doi.org/10.1111/j.1550-7408.1999.tb04612.x

45. Camacho C, Coulouris G, Avagyan V, Ma N, Papadopoulos J, *et al*. BLAST+: Architecture and applications. BMC Bioinformatics. 2009;10:421. https://doi.org/10.1186/1471-2105-10-421

46. Asyakina LK, Serazetdinova YuR, Frolova AS, Fotina NV, Neverova OA, *et al*. Antagonistic activity of extremophilic bacteria against phytopathogens in agricultural crops. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):565–575. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2457

47. Серазетдинова Ю. Р., Богачева Н. Н., Фасхутдинова Е. Р., Асякина Л. К., Проскурякова Л. А. Аспекты совместного культивирования *Bacillus amyloliquefaciens* и *Bacillus aryabhattai* для интенсификации синтеза ростостимулирующих веществ. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024. Т. 54. № 6. С. 41–48. [Serazetdinova YuR, Bogacheva NN, Faskhutdinova ER, Asyakina LK, Proskuryakova LA. Aspects of the joint cultivation of *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus aryabhattai* for the intensification of growth-stimulating substances synthesis. Siberian Herald of Agricultural Science. 2024;54(6):41–48. (In Russ.)] https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-6-4

48. Бородина Е. Е., Серазетдинова Ю. Р., Фасхутдинова Е. Р., Богачёва Н. Н., Фотина Н. В. и др. Роль *Bacillus amyloliquefaciens* в снижении абиотического стресса зерновых культур. XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 4. С. 178–183. [Borodina EE, Serazetdinova YuR, Faskhutdinova ER, Bogacheva NN, Fotina NV, *et al*. Investigation of the effect of endophytic bacteria on the growth rates of spring wheat. Biotekhnologiya. 2023;12(4):178–183. (In Russ.)] https://doi.org/10.25205/978-5-4437-1691-6-51

49. Асякина Л. К., Бородина Е. Е., Фотина Н. В., Неверова О. А., Милентьева И. С. *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium* и *Pseudomonas putida* в восстановлении техногенно нарушенных территорий Кузбасса. Поволжский экологический журнал. 2024. № 4. С. 385–398. [Asyakina LK, Borodina EE, Fotina NV, Neverova OA, Milentyeva IS. *Pseudomonas fluorescens, Bacillus megaterium*, and *Pseudomonas putida* in the restoration of technogenically disturbed territories of the Kuzbass. Povolzhskiy Journal of Ecology. 2024;(4):385–398. (In Russ.)] https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-4-385-398

50. Асякина Л. К., Исачкова О. А., Колпакова Д. Е., Бородина Е. Е., Богер В. Ю. и др. Влияние микробного консорциума на рост и развитие ярового ячменя в условиях Кемеровской области – Кузбасса. Зерновое хозяйство России. 2024. Т. 16. № 1. С. 104–112. [Asyakina LK, Isachkova OA, Kolpakova DE, Borodina EE, Boger VYu, *et al*. The effect of a microbial consortium on spring barley growth and development in the Kemerovo region, Kuzbass. Grain Economy of Russia. 2024;16(1):104–112. (In Russ.)] https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-90-1-104-112

51. Серазетдинова Ю. Р., Фотина Н. В., Асякина Л. К., Милентьева И. С., Просеков А. Ю. Ризобактерии для снижения биотического стресса яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), вызванного фитопатогенными грибами. Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 4. С. 98–113. [Serazetdinova YuR, Fotina NV, Asyakina LK, Milentyeva IS, Prosekov AYu. Rhizobacteria for reducing biotic stress in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) caused by phytopathogenic fungi. Storage and Processing of Farm Products. 2023;(4):98–113. (In Russ.)] https://doi.org/10.36107/spfp.2023.4.515

52. Serazetdinova YuR, Borodina EE, Fotina NV, Naik A, Mudgal G, *et al*. Rhizobia as complex biofertilizers for wheat: Biological nitrogen fixation and plant growth promotion. Foods and Raw Materials. 2026;14(1):214–227. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-1-669

53. Fotina NV, Serazetdinova YR, Kolpakova DE, Asyakina LK, Atuchin VV, *et al*. Enhancement of wheat growth by plant growth-stimulating bacteria during phytopathogenic inhibition. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2024;60:103294. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103294

54. Faskhutdinova ER, Fotina NV, Neverova OA, Golubtsova YuV, Mudgal G, *et al*. Extremophilic bacteria as biofertilizer for agricultural wheat. Foods and Raw Materials. 2024;12(2):348–360. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-613

55. Suleimanova AD, Sokolnikova LV, Egorova EA, Berkutova ES, Pudova DS, *et al*. Antifungal activity of siderophore isolated from *Pantoea brenneri* against *Fusarium oxysporum*. Russian Journal of Plant Physiology. 2023;70:199. https://doi.org/10.1134/S1021443723602744

56. Herrera SD, Grossi C, Zawoznik M, Groppa MD. Wheat seeds harbour bacterial endophytes with potential as plant growth promoters and biocontrol agents of *Fusarium graminearum*. Microbiological Research. 2016;186–187:37–43. https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.03.002

57. Walterson AM, Stavrinides J. *Pantoea*: Insights into a highly versatile and diverse genus within the Enterobacteriaceae. FEMS Microbiology Reviews. 2015;39(6):968–984. https://doi.org/10.1093/femsre/fuv027

58. Firoz AA, Iqbal A, Pichtel J, Husain FM. *Pantoea agglomerans* FAP10: A novel biofilm-producing PGPR strain improves wheat growth and soil resilience under salinity stress. Environmental and Experimental Botany. 2024;222:105759. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105759

59. Guardiola-Márquez CE, Santos-Ramírez MT, Figueroa-Montes ML, Valencia-de los Cobos EO, Stamatis-Félix IJ, *et al*. Identification and characterization of beneficial soil microbial strains for the formulation of biofertilizers based on native plant growth-promoting microorganisms isolated from Northern Mexico. Plants. 2023;12(18):3262. https://doi.org/10.3390/plants12183262

60. Bakhshandeh E, Pirdashti H, Lendeh KS. Phosphate and potassium-solubilizing bacteria effect on the growth of rice. Ecological Engineering. 2017;103(Part A):164–169. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.008

61. Choudhary S, Singh Saharan B, Gera R, Kumar S, Prasad M, *et al*. Molecular characterization and validation of zinc solubilization potential of bacteria isolated from onion (*Allium cepa* L.) rhizosphere. The Microbe. 2024;4:100145. https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100145

62. Ma Q, He S, Wang X, Rengel Z, Chen L, *et al*. Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacterium *Pantoea rhizosphaerae* sp. nov. from *Acer truncatum* rhizosphere soil and its effect on *Acer truncatum* growth. Frontiers in Plant Science. 2023;14:1218445. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1218445

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Бородина Екатерина Евгеньевна / Ekaterina E. Borodina ORCID 0000-0001-6362-7589; eLIBRARY SPIN 9708-9200
Плешивцев Иван Игоревич / Ivan I. Pleshivtsev eLIBRARY SPIN 5774-4748
Фотина Наталья Вячеславовна / Nataliya V. Fotina ORCID 0000-0002-7655-0258; eLIBRARY SPIN 5500-7190
Федорова Анастасия Михайловна / Anastasiya M. Fedorova ORCID 0000-0002-8071-4411; eLIBRARY SPIN 4142-7468
Мартиросян Владимир Викторович / Vladimir V. Martirosyan ORCID 0000-0002-4026-5789; eLIBRARY SPIN 5140-5360

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2602
https://elibrary.ru/WMZZOJ

Обзорная статья
https://fptt.ru

Применение хемометрики в аналитике пищевых систем

А. Б. Лисицын, И. М. Чернуха*, М. А. Никитина, В. А. Пчелкина

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

Поступила в редакцию: 23.05.2025
Принята после рецензирования: 09.07.2025
Принята к публикации: 05.08.2025

**e-mail: imcher@inbox.ru*
© А. Б. Лисицын, И. М. Чернуха, М. А. Никитина, В. А. Пчелкина, 2025

Аннотация.
Пищевой продукт – это сложная пищевая система, оценка качества которой требует целостного подхода. Хемометрика позволяет получить важную информацию при анализе пищевых продуктов. Цель исследования – показать перспективы применения хемометрических методов в обработке экспериментальных данных в пищевых системах.
Объектами исследования являлись научные публикации отечественных и зарубежных ученых. Поиск научных источников осуществляли в базах данных Scopus, PubMed, MEDLINE, Web of Knowledge, Google Scholar, IEEE Xplore, Science Direct, eLIBRARY.RU (РИНЦ). Поисковые запросы включали следующие ключевые слова и словосочетания: хемометрика (chemometrics); хемометрические методы (chemometric methods); метод главных компонент (principal component analysis); PLS (projection on latent structures); искусственная нейронная сеть, ИНС (artificial neural network, ANN); многомерная классификация (multivariate classification); многомерный анализ данных (multivariate data analysis).
Рассмотрены основные инструменты хемометрики, используемые при анализе пищевых систем: иерархический кластерный анализ (HCA), метод главных компонент (PCA), дискриминантный анализ с помощью регрессии на латентные структуры (PLS-DA), методы проекции на латентные структуры (PLS), квадратичная проекция на латентные структуры PLS (QPLS), множественная линейная регрессия (MLR), искусственная нейронная сеть (ANN), метод опорных векторов (SVM), классификация по *k*-ближайшим соседям (KNN), методы ансамблей (RF, XGBoost). Из всего разнообразия хемометрических методов наиболее востребованным является PCA. Анализ научных публикаций показал, что для каждого вида пищевой продукции лучше использовать не один метод, а их сочетание. Методы классификации в каждом отдельном случае показывают разные результаты.
Исследования показали, что наиболее оптимально применять хемометрические методы не по отдельности, а в совокупности, например PCA + PLS-DA + ANN или PCA + PLS-DA + KNN. Сочетание инструментальных и хемометрических методов не только улучшает точность анализов, но и трансформирует подходы к управлению качеством для обеспечения устойчивого производства в пищевой промышленности.

Ключевые слова. Хемометрика, пищевые продукты, метод главных компонент, проекция на латентные структуры, классификация, регрессия

Финансирование. Статья подготовлена в рамках выполнения темы НИР № FGUS-2024–0002 государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем имени В. М. Горбатова» РАН.

Для цитирования: Лисицын А. Б., Чернуха И. М., Никитина М. А., Пчелкина В. А. Применение хемометрики в аналитике пищевых систем. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 723–743. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2602

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2602
https://elibrary.ru/WMZZOJ

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

Chemometrics in Laboratory Data Analysis

Andrey B. Lisitsyn, Irina M. Chernukha*, Marina A. Nikitina, Viktoriya A. Pchelkina

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

Received: 23.05.2025
Revised: 09.07.2025
Accepted: 05.08.2025

**e-mail: imcher@inbox.ru*

© A.B. Lisitsyn, I.M. Chernukha, M.A. Nikitina, V.A. Pchelkina, 2025

Abstract.
Food is a complex system that requires holistic quality assessment. Chemometrics uses mathematical, statistical, and computer science methods to analyze and interpret chemical data, which means good prospects for food quality evaluation.
This review covered Russian and international publications indexed in Scopus, PubMed, MEDLINE, Web of Knowledge, Google Scholar, IEEE Xplore, Science Direct, and eLIBRARY.RU (RSCI). The search queries included such keywords as chemometrics; chemometric methods; principal component analysis; PLS (projection to latent structures); artificial neural network (ANN); multivariate classification; multivariate data analysis.
The main chemometric tools applied to food systems included hierarchical cluster analysis (HCA), principal component analysis (PCA), latent structures-discriminant analysis (PLS-DA), projections to latent structures (PLS), quadratic projection to latent structures (QPLS), multiple linear regression (MLR), artificial neural network (ANN), support vector machine (SVM), *k*-nearest neighbors (KNN), and ensemble model prediction (RF, XGBoost). The PCA proved to be the most popular chemometric method applied in the food industry. However, combinations of methods were always more effective than a single one. The KNN methods appeared to be quite unreliable.
Combinations of chemometric methods demonstrate the best prospects, e.g., PCA + PLS-DA + ANN or PCA + PLS-DA + KNN. If combined with instrumental tools, they are able to improve analytical accuracy and provide effective management approaches, thus ensuring sustainable food industry.

Keywords. Chemometrics, food, principal component analysis, projections to latent structures, classification, regression

Funding. The research was part of State Assignment No. FGUS-2024-0002 to the Federal Research Center for Food Systems, Russian Academy of Sciences.

For citation: Lisitsyn AB, Chernukha IM, Nikitina MA, Pchelkina VA. Chemometrics in Laboratory Data Analysis. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):723–743. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2602

Введение

Термин “kemometri” введен Сванте Вольдом в 1971 г. при подаче заявки на грант. Впервые этот термин использовался в его статье, опубликованной в журнале “Kemisk Tidskrift” в 1972 г. на шведском языке и посвященной кубическим сплайнам [1].

Сотрудничество С. Вольда с Б. Ковальски способствовало появлению понятия “chemometrics” в английском языке. В 1975 г. они создали Международное общество хемометрики.

В своих воспоминаниях [2] С. Вольд отмечает: «Искусство извлечения химически значимой информации из данных, полученных в химических экспериментах, получило название «хемометрика» по аналогии с биометрией, эконометрикой и т. д. Хемометрика, как и другие метрики, в значительной степени зависит от использования различных видов математических моделей (модели высокой информации, модели ad hoc и модели аналогии). Эта задача требует знания статистики, численного анализа, анализа операций и т. д., а в целом – прикладной математики. Однако, как и во всех прикладных отраслях науки, сложные и интересные проблемы определяются приложениями; в хемометрике основной вопрос заключается в структурировании химической проблемы в форме, которую можно выразить как математическое отношение. Связанные математические проблемы довольно просты, как это обычно бывает со статистическими задачами. Поэтому хемометрику нельзя отделять от химии или позволять ей становиться отдельной отраслью химии; она должна оставаться неотъемлемой частью всех областей химии».

Наиболее известными публикациями С. Вольда являются “Principal component analysis” (1987 г.) [3]; “PLS-regression: A basic tool of chemometrics” (2001 г.) [4]; “Cross-validatory estimation of the number of components

in factor and principal components models" (1978 г.) [5]. Лучшая работа Б. Ковальски в соавторстве с П. Гелади – "Partial least-squares regression: A tutorial" (1986 г.) [6].

Хемометрика обрела популярность после конференции по хемометрике, математике и статистике в химии, которую организовал институт передовых исследований НАТО 12–13 сентября 1983 г. в г. Козенца, Италия [7]. После этого начали проводить конференции, издавать журналы (Journal of Chemometrics; Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems), выпускать пакеты прикладных программ и книги. В Европе несколько исследовательских групп, в основном в области аналитической химии, занялись хемометрикой, а Д. Л. Массарт и его коллеги создали один из самых ранних всеобъемлющих учебников "Chemometrics: A textbook" (1988 г.).

Определение «хемометрики» Д. Л. Массарта остается актуальным: «Хемометрика – это химическая дисциплина, которая использует математику, статистику и формальную логику (a) для проектирования или выбора оптимальных экспериментальных процедур; (b) для предоставления максимально релевантной химической информации путем анализа химических данных; и (c) для получения знаний о химических системах» [8].

В России А. Л. Померанцев и О. Е. Родионова были основоположниками Русского хемометрического общества. Первую зимнюю школу-конференцию по хемометрике провели в Костроме 11–15 февраля 2002 г. Обзорные статьи об основных достижениях в области хемометрики опубликованы А. Л. Померанцевым и О. Е. Родионовой в 2006 г. [9, 10].

Хемометрика прошла путь от узкого раздела аналитической химии до междисциплинарной науки, применяемой в биологии, медицине, пищевой промышленности и экологии. Современные тенденции развития хемометрики, связанные с интеграцией машинного обучения и искусственного интеллекта, открывают новые горизонты для исследований и практического применения.

Peris-Díaz и Krężel [11] с помощью искусственного интеллекта построили топологическую сеть используемых методов хемометрики в научных публикациях с 2018 г. (рис. 1). Сформировано три основных кластера (желтый, фиолетовый и зеленый цвет на рис. 1). Размер меток масштабируется в соответствии с частотой появления метода и термина в анализируемых публикациях.

В хемометрике чаще всего используют следующие методы: главные компоненты (PCA); проекция на латентные структуры (PLS); дискриминантный анализ с помощью регрессии на латентные структуры (PLS-DA); квадратичный PLS (QPLS); искусственная нейронная сеть (ANN); классификация по *k*-ближайшим соседям (KNN) и т. д.

Цель исследования – показать перспективы применения данных методов в обработке экспериментальных данных в пищевых системах.

Объекты и методы исследования

Проведен поиск и комплексный системный анализ публикаций по ключевым словосочетаниям: хемометрика (chemometrics); хемометрические методы (chemometric methods); метод главных компонент (principal component analysis); PLS (projection on latent structures); искусственная нейронная сеть, ИНС (artificial neural network, ANN); многомерная классификация (multivariate classification), многомерный анализ данных (multivariate data analysis) в базах данных

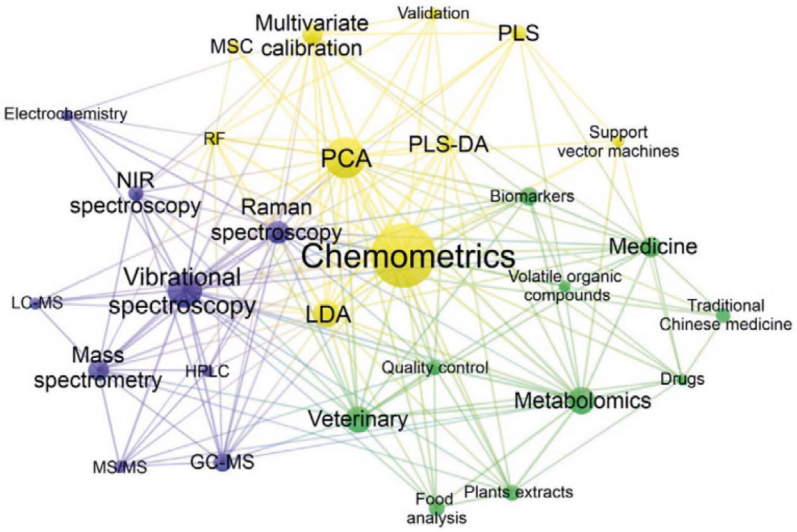


Рисунок 1. Топологическая карта взаимосвязи хемометрических методов (желтый), аналитических методов (фиолетовый) и областей применения (зеленый) [11]

Figure 1. Correlation map: chemometric methods (yellow), analytical methods (purple), and application areas (green) [11]

Scopus, PubMed, MEDLINE, Web of Knowledge, Google Scholar, IEEE Xplore, Science Direct, eLIBRARY.RU (РИНЦ) за период 2000–2025 гг.

Найденные публикации (статьи, книги, монографии, очерки) предварительно проанализировали по аннотации и ключевым словам. В качестве критериев включения выбраны:
– научные исследования о хемометрике, методах и алгоритмах реализации;
– публикации об исследовании данных, задачах классификации и дискриминации, моделирования и прогнозирования;
– условия применения в пищевых системах;
– ограничения применения;
– публикации преимущественно на русском и английском языках.

Критерий исключения – научные публикации, не связанные с пищевыми системами.

За последние 24 года количество публикаций с использованием хемометрических методов возросло приблизительно в 18 раз. Так, в 2001 г. было всего 109 публикаций, а в 2024 г. – 2005.

В результате поиска литературы получено 3 517 аннотаций и статей. На первом этапе провели анализ наименования анализируемых статей. Часть публикаций исключили ввиду несоответствия критериям включения. 198 ссылок признали потенциально подходящими. Далее проанализировали рефераты работ, осуществили второе исключение. После анализа статей и аннотаций оставшиеся 104 статьи включили в обзор. Из каждой публикации отобрали следующую информацию: автор(ы), год публикации, страна, цель и методика исследования, полученные результаты. Детальный анализ каждой включенной в обзор публикации проводили на основе конкретных элементов исследовательских вопросов и цели обзора. Одновременно был осуществлен ручной поиск ссылок на связанные статьи, чтобы не пропустить значимые публикации.

Результаты и их обсуждение

Хемометрика объединяет статистические, математические и алгоритмические методы для анализа экспериментальных данных, в том числе результатов химических анализов. Основные методы включают:
– PCA (метод главных компонент, principal component analysis) используется для снижения размерности, визуализации кластеров;
– PLS (методы проекции на латентные структуры, partial least squares) и PLS-DA (PLS discriminant analysis, дискриминантный анализ с помощью регрессии на латентные структуры) применяют для построения регрессии и классификации при мультиколлинеарности данных;
– кластерный анализ (HCA, *k*-means) – группировка объектов по схожести;
– MLR (multiple linear regression) – калибровочные модели для количественного анализа;
– SVM (метод опорных векторов, support vector machine) и ANN (искусственная нейронная сеть, artificial neural networks) – нелинейная классификация и регрессия;
– методы ансамблей (random forest (RF), XGBoost) – прогнозирование сложных зависимостей.

Дополнительно к хемометрическим методам применяют инструментальные методы анализа:
– спектроскопия (ИК, УФ-видимая, Рамановская, ЯМР);
– хроматография (ГХ, ЖХ) и электрофорез;
– масс-спектрометрия (GC-MS, LC-MS);
– электрохимические методы (вольтамперометрия, потенциометрия);
– сенсоры и мультисенсорные системы.

Сводная информация представлена в таблице 1. Наибольшее внимание было уделено публикациям с использованием хемометрических и инструментальных методов в пищевой промышленности и животноводстве.

Примеры включают контроль качества, безопасность продукции и оптимизацию процессов.

На основании анализа отобранных статей составили топологическую карту взаимосвязи хемометрических методов (красный цвет), инструментальных методов (зеленый цвет) и направлений исследования (голубой цвет), представленную на рисунке 2.

Сформировано 5 направлений исследования. Наибольшее внимание в научных публикациях уделяется оценке качества (42 % от общего числа рассмотренных публикаций), на втором месте – направление идентификации и классификации (26 %). Среди хемометрических методов популярны PLSR, PCA; среди инструментальных – Рамановская спектроскопия, ближняя инфракрасная спектроскопия (NIRS), гиперспектральная визуализация (HIS).

Оценка качества (контроль качества). Применение хемометрических и инструментальных методов для оценки и контроля качества пищевой продукции позволяет решить ряд задач: определение химического состава (жиры, белки, углеводы, влага, минералы); обнаружение примесей, загрязнителей (пестициды, тяжелые металлы, микотоксины); мониторинг технологических процессов (ферментация, термообработка, хранение).

Paula и Conti-Silva [12] проводили оценку текстуры экструдированных снеков. С использованием PCA оценили 11 коммерческих экструдированных снеков различной формы. Текстуру описывали дескрипторами: твердость, хрустящая корочка, липкость, ломкость, жевательная способность. Цилиндрические снеки оценивались по хрустящей корочке и ломкости; гранулированные снеки и снеки в форме ракушек – по жевательной способности, а кольцеобразные снеки – по клейкости и твердости. PCA сенсорных и инструментальных данных показал, что вклад в общую дисперсию PC1 и PC2 составлял 74,4 %, при этом PC1 = 48,5 %, PC2 = 25,9 %. Первая главная

Таблица 1. Взаимосвязи инструментальных методов с хемометрическими для решения задач исследования пищевых продуктов

Table 1. Combinations of instrumental and chemometric methods in food science

Методы анализа		Задачи
Инструментальные	Хемометрические	
ИК-спектроскопия (ближний и средний ИК-диапазон)	PCA (principal component analysis)	снижение размерности, визуализация
		классификация продуктов по происхождению (выявление фальсификации оливкового масла / смеси с дешевыми аналогами)
	PLS (partial least squares)	калибровка концентраций
		быстрый контроль качества на производственной линии (прогнозирование содержания жира, белка и влаги в молоке и сыре)
	SVM	классификация полимеров
Газовая хроматография-масс-спектрометрия (ГХ-МС)	Кластерный анализ (HCA)	кластеризация летучих соединений
		оптимизация рецептур для целевого вкуса (группировка ароматических профилей вина или кофе)
	PCA	идентификация метаболитов
	RF (random forest)	прогнозирование токсичности
	SVM (support vector machines)	обеспечение безопасности продукции (обнаружение пестицидов во фруктах и овощах)
Жидкостная хроматография (ЖХ)	MLR (multiple linear regression)	количественный анализ лекарств
		соответствие нормам маркировки (количественный анализ витаминов в соках и детском питании)
	PLS-DA	разделение фармацевтических форм
Электрохимия	ANNs	прогнозирование pH и ионной силы
	k-means	обнаружение аномалий в сигналах
Рамановская спектроскопия	PCA + кластерный анализ	диагностика биологических тканей
	ANN (искусственные нейронные сети)	контроль текстуры продукта (определение степени кристаллизации шоколада)
Масс-спектрометрия (LC-MS)	PLS-DA (PLS discriminant analysis)	мониторинг биобезопасности (идентификация патогенов (сальмонелла, листерия) в мясе и яйцах)
УФ-видимая спектроскопия	PCA + *k*-means	классификация туш по свежести (оценка качества мяса по содержанию миоглобина)
Мультисенсорные системы (электронный нос / язык)	Методы ансамблей (XGBoost)	раннее выявление заболеваний (диагностика мастита у коров по анализу молока)
Электрохимические сенсоры	RF (random forest)	предотвращение заболеваний у скота (анализ состава кормов – определение токсинов, например, афлатоксинов)

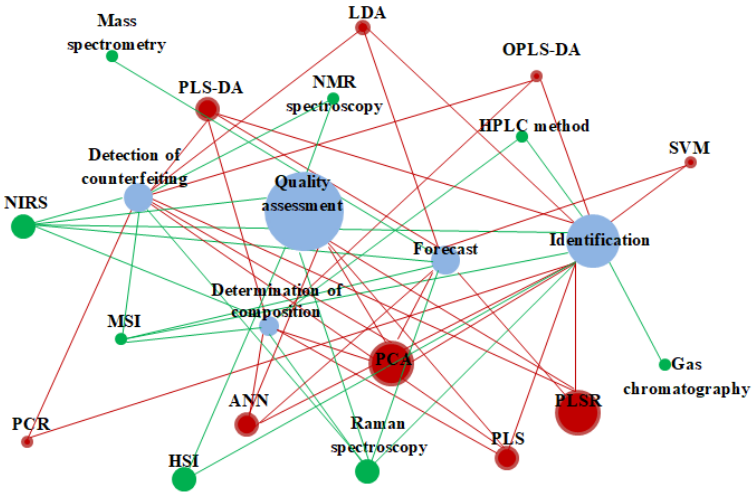


Рисунок 2. Топологическая карта хемометрических, инструментальных методов в направлении исследования пищевых систем

Figure 2. Chemometric and instrumental methods in food system research

компонента объясняла все сенсорные характеристики (твердость, хрусткость, клейкость, хрупкость и жевательную способность) и инструментальные силы с использованием гильотины и V-образной формы. Вторая главная компонента – сжатие, прокол и сдвиг.

Dhanapal и Erkinbaev [13] провели исследование котлеты из мясных бургеров на растительной основе. Многомерными методами анализа авторы определили роль основных ингредиентов (текстурированного и нетекстурированного белка) на качество продукта в течение хранения. Используя спектры в видимом-ближнем инфракрасном диапазоне (400–1000 нм) и PCA, прогнозировали показатели качества (цвет, влажность, pH и твердость) растительных мясных бургеров различных составов. Показатели фиксировали в течение 14-дневного периода хранения у образцов с содержанием текстурированного растительного белка от 10 до 30 % и горохового белка от 5 до 10 %. Результаты PCA показали нестабильность качества растительных мясных бургеров даже в течение короткого периода хранения. Кроме того, PCA продемонстрировал успешное пространственное разделение образцов растительных мясных бургеров в процессе хранения в зависимости от концентраций текстурированного растительного белка и горохового белка. PC1 объяснял 53,4 % от общей дисперсии и отвечал за яркость цвета, pH, влажность, активность воды (a_w), когезионность и вязкость. PC2 составлял 21,24 % от общей дисперсии и оценивал желтизну цвета, содержание влаги и a_w. PC1 уловил основную изменчивость среди основных типов ингредиентов. Образцы на основе текстурированного растительного белка имели положительные оценки, а образцы на основе горохового белка – отрицательные оценки. PC2 отражал изменчивость, связанную с концентрацией текстурированного растительного белка. Образцы с низкой концентрацией текстурированного растительного белка также имели отрицательные оценки. С увеличением концентрации текстурированного растительного белка оценки переходили в область положительных значений. Следовательно, PCA может оценить качество пищевого продукта.

Xiao *et al*. [14] исследовали различные характеристики мяса 434 бройлеров 12 различных пород в Южном Китае. Исследование направлено на установление закономерностей влияния разных покателей на качество мяса бройлера. PCA проведен по 17 показателям, характеризующим качество мяса. Авторы установили существенные различия в качестве мяса бройлеров породы Xiaobai и др. Качественные характеристики тушек породы Guangxi Sanhuang более уникальные в сравнении с другими породами. Качество мяса породы Huangma совпадало с породой Zhongshan Shalan. Наиболее значимыми качественными показателями, согласно PCA, являются количество и вес брюшного жира, внутримышечный жир грудки и ширина межмышечного жира.

В исследовании [15] PLS использовали для изучения данных о качестве мяса, полученных с помощью инструментов хемометрики (включая усилие сдвига Warner-Bratzler и компрессию Instron) и сенсорных панелей. В ходе испытаний по горячей обвалке было использовано три способа обработки (горячая обвалка в течение 1 и 4 ч и обычная холодная обвалка) и два способа выдержки в вакуумной упаковке (выдержка в течение 1 и 4 недель при температуре 1 °C). Для анализа методом PLS использовали данные по 63 отрезкам (мышцам) говяжьей филейной части (*Longissimus dorsi*), собранные в ходе исследования. Для каждой мышцы были сняты шесть показаний: процент потерь при приготовлении ($\%_{cl}$), конечный pH мышцы, сжатие Instron (по Инстрону, IC), длина саркомера (sarc) и два измерения Warner-Bratzler – начальный выход (IY) и пиковая сила (PF). У каждой мышцы также сняли четыре показания сенсорных переменных: нежность, сочность, вкус и приемлемость. Оценка сенсорных переменных осуществлялась группой экспертов по 9 бальной шкале (1 – очень жесткий, очень сухой, без вкуса или очень плохой, а 9 – очень нежный, очень сочный, сильный вкус или очень хороший). Однофакторный анализ нежности показал, что более 60 % вариации сенсорной нежности и почти 60 % вариации сенсорной приемлемости можно объяснить с помощью инструментальных переменных, а также учета времени обвалки и выдержки. Графические отображения анализа показали, что горячая обвалка (через 1 или 4 ч) оказала незначительное влияние на качество мяса; продемонстрировали потенциальную важность влияния выдержки в вакуумной упаковке на приемлемость. По-видимому, образцы данного исследования приблизительно одинаковой нежности различались по приемлемости в зависимости от того, выдерживались ли образцы в течение 1 или 4 недель.

Araújo *et al*. [16] с использованием PLS изучали взаимосвязи между показателями формы туши, характеристиками тканей туши и коммерческими отрубами ягнят с целью оценки способности видеоизображений последовательно описывать качество мяса. Для моделирования использовали информацию о 67 охлажденных тушах кастрированных ягнят мужского пола в возрасте от 8 до 11 месяцев. Животные откормлены в условиях изоляции и имели массу тела при убое от 21 до 49 кг, что отражало изменчивость критериев убоя в этих стадах. За основные переменные приняты масса охлажденной туши (CCW, кг) и ее выход (CCY, %); за скрытые переменные – форма туши, качество мяса, состав тканей туши и товарного отруба. В результате исследования были оценены три модели, отличающиеся друг от друга по форме туши. Одна из моделей с общей проекцией туши и ее частей признана подходящей. С ее помощью возможно прогнозировать характеристики качества мяса с учетом потерь при приготовлении и усилия

сдвига. Кроме того, рассматриваемая туша позволяла устанавливать категории для классификации туш, которые напрямую определяют сочность и нежность мяса на основе скрытых переменных, учитываемых при изучении формы туши, описания ее тканей и основных отрубов.

В исследовании [17] для оценки кислотности молока использовали Рамановскую спектроскопию в сочетании с хемометрическим анализом ANN. Шесть образцов молока по 10 мл отбирались случайным образом каждый день без повторного использования. Молоко после энергичного перемешивания помещалось на предметные стекла. Три точки на капле каждого образца молока случайным образом отобраны для записи Рамановских спектров. Три спектра, собранные из каждого образца, усреднили в один спектр как спектр образца для уменьшения случайной ошибки, вызванной неоднородностью образца. Спектрометр откалибровали по пику первого порядка кремния. Интегральное время одного сканирования составило 5 с, мощность лазера – 175 мВт в фокальной точке поверхности образца, а кумулятивное число – 8 для улучшения качества сигнала. Рамановские спектры измерялись ежедневно до тех пор, пока кислотность молока не достигла около 30 °Т. Для молока, помещенного в холодильник при температуре 4 °С, потребовалось 9 дней. ANN имела следующую структуру: входной слой содержал 1023 нейрона, количество нейронов в трех скрытых слоях составляло 100 для каждого, количество выходных нейронов – 1. Использовали функцию активации «ReLU». Количество итераций на обучение – 1000. Кислотность молока точно прогнозировалась с использованием модели BP-ANN. Корреляция между прогнозируемыми и измеренными значениями достигла 0,9909, а среднеквадратичное отклонение составило всего 0,3400 °Т.

Таким образом, сочетание методов хемометрических и инструментальных показателей в оценке качества пищевой продукции увеличивает скорость анализа: сочетание NIR и PLS; ИК-спектроскопия (NIR, MIR) и PLS, PCA позволяет за секунды оценить состав или содержание отдельных нутриентов без разрушения образца; повышает точность исследования (эксперимента) за счет устранения шумов. Фильтрация данных осуществлена с помощью PCA.

Идентификация, классификация. Идентификация и классификация необходимы чтобы определять подлинность (выявление фальсификатов: разбавленное молоко, поддельное оливковое масло); производить классификацию по различным дескрипторам, параметрам, факторам (например, по происхождению, сорту, технологическим параметрам); различать свежую и испорченную продукцию и т. д. В этом разделе отражены два подхода: классификация и дискриминация; количественный анализ посредством градуировочных моделей.

Классификация и дискриминация. Цель данного подхода – разделение образцов на категории по происхождению, типу, качеству и подлинности.

Метод PCA (визуализация данных, снижение размерности). В работе [18] были проведены исследования мармелада на агар-, желатиновой и пектиновой основе с мальтитом, сухофруктами и ягодами для контроля гликемии с использованием PCA. Результаты PCA, примененные к данным сенсорного анализа, показали вклад двух главных компонент (PC1 и PC2) в общую дисперсию на уровне 77,71 %. Первая главная компонента (PC1; 51,83 %) положительно коррелирует с дескрипторами вкуса, особенно со сладким и вяжущим вкусами. Вторая главная компонента (PC2; 25,88 %) взаимосвязана с дескрипторами текстуры (однородность, клейкость, упругость). Образцы мармелада разделены на 3 группы в зависимости от типа используемого гелеобразователя. Образцы на основе пектина имели достаточное сходство между собой, несмотря на различия в типах вкусо-ароматических соединений и их концентраций.

Deegan *et al*. [19] исследовали улучшение вкуса и текстуры у сыров с пониженным содержанием жира. Перцептивное пространство профилированных сыров оценивали с использованием PCA. На первый главный компонент приходилось 64 % общей дисперсии, на второй – 31 %. В PC1 с положительным знаком входила интенсивность вкуса, запаха и блеска, консистенция, цвет; с отрицательным знаком – размер глазка, желтизна, твердость, рассыпчатость, эластичность. В PC2 с отрицательным знаком – ореховый и кислый запах; с положительным – сладкий вкус и маслянистый запах. Визуальное отображение было представлено следующим образом: дескрипторы сильный запах, острый, сухой, твердый и рассыпчатый, обезжиренный, безвкусный, мягкий и странный / плохой расположены на противоположной стороне от PC1. В центре помещались дескрипторы ореховый, плотный, кислый; в нижней части – приятный, полный, мягкое послевкусие, сливочный и вкусный.

В исследовании [20] изучили влияние генетического отбора на качество мяса уток – быстрорастущих (LCA) и медленнорастущих (LCC). С помощью PCA рассмотрели показатели MUFA, WHC, WBSF, EAA и FAA. Общая дисперсия PC1 и PC2 составила 60,7 %. Наибольшее влияние на мясо грудки LCA оказывали PUFA, SFA, WBSF и MUFA. На качество мяса бедра как у LCA, так и LCC наибольшее влияние оказывал WHC.

В [21] использование PCA позволило идентифицировать мясо двух групп яков (пастбищных и откормочных) по спектральным изменениям. Проанализированы спектры 36 образцов. Совокупный вклад PC1 и PC2 превышал 95 %. Визуально мясо откормочных яков находилось на положительной стороне PC2 (I квадрант), мясо пасущихся яков на отрицательной стороне PC2 (II квадрант).

Maritha *et al*. [22] для обеспечения халяльной подлинности свинины и говядины в трехглавой мышце плеча (*Triceps brachii*), длиннейшей мышце спины (*Longissimus dorsi*) и двуглавой мышце бедра (*Biceps femoris*) использовали липидомный анализ. Для определения различий в липидных компонентах трехглавой мышцы плеча, длиннейшей мышцы спины и двуглавой мышцы бедра, а также наиболее важных компонентов для определения халяля применяли PCA. В результате выявлено различие липидных характеристик говяжьих и свиных мышц (*T. brachii, L. dorsi* и *B. femoris*) в обоих ионных режимах.

Amelin *et al*. [23] предложили экспресс-метод идентификации масла и жировых продуктов растительного происхождения по их флуоресценции и диффузному отражению ИК-излучения методами цветометрии и ближней ИК-спектроскопии. Идентификация и дифференциация исследуемых объектов осуществлена с использованием хемометрических алгоритмов – метода главных компонент (PCA) и иерархического кластерного анализа (HCA). Массовая доля жира в заявленной продукции определена с помощью одномерного и многомерного (PLS) анализа.

На графиках PCA и HCA фальсификаты сливочного масла находились обособленно от натуральных продуктов и не пересекались друг с другом на дендрограмме. Апробация рассматриваемых методов проведена с пробами сливочного масла и маслорастительных продуктов разных производителей. В случае многомерного анализа для молочных продуктов RMSEP ≤ 4,97 %; для маргарина RMSEP > 10,00 %. При использовании одномерного анализа относительное отклонение результатов у молочных продуктов от массовой доли жира, указанной на упаковке, не превышало 4,8 %; у маргарина – в пределах 96,3–96,5 %.

В исследовании [24] авторы показали возможность идентификации и аутентификации сухого коровьего молока методом цветометрии собственной флуоресценции образцов с использованием устройства для непосредственного (прямого) цветометрического анализа. Оценку массива данных цветометрических параметров флуоресценции (RGB) осуществляли методами главных компонент (PCA) и иерархического кластерного анализа (HCA).

Платов и соавторы [25] провели спектроколориметрическое исследование в сочетании с методами многомерного статистического анализа для идентификации гречневой крупы. Разработка классификационных моделей включала формирование баз данных цветовых координат в колориметрической системе CIE *L*a*b**, коэффициентов спектра отражения в видимой области образцов гречневой крупы и применение алгоритмов многомерного анализа (кластерный и дискриминантный анализ, метод главных компонент). При использовании кластерного и дискриминантного анализа разработана классификация гречневой крупы по цветовым координатам. При длительном хранении непропаренной гречневой крупы повышается краснота (*a*) спектра, взаимосвязанная с процессами ферментативного потемнения. Анализ коэффициентов спектра отражения проводился с помощью метода главных компонент, выявлены участки спектра, изменение коэффициентов отражения которых взаимосвязано с физико-химическими процессами при термической обработке и длительном хранении гречневой крупы. Значительный вклад в дискриминацию образцов вносят факторные нагрузки коэффициентов отражения при 410 и 460, 650 и 680 нм, соответствующие полосам поглощения рутина и хлорофилла.

Platov *et al*. [26] проанализировали использование методов УФ-видимой-ближней ИК-спектроскопии в сочетании с многомерным анализом для классификации и идентификации гречневой крупы. Методом кластерного анализа образцы гречневой крупы, различающиеся временем урожая, размерами ядра, способом гидротермической обработки и сроками хранения, разделены на группы. Методом главных компонент выявлены полосы поглощения спектров УФ-видимых-ближних ИК-областей, соответствующие функциональным группам компонентов состава и вносящие наибольший вклад в разделение образцов на категории качества гречневой крупы. Методом дискриминантного анализа подтверждена гипотеза о разделении образцов на группы и построена классификационная функция для идентификации и сортировки гречневой крупы.

Для разработки моделей идентификации зернового кофе в исследовании [27] сформировали базу спектральных данных Фурье-ИК-спектроскопии и применили методы многомерного анализа – метод главных компонент и дискриминантный анализ. По спектральным данным PCA построена многомерная модель градации образцов кофе в зависимости от ботанического вида и наличия обжарки. По матрице факторных нагрузок выявлены полосы поглощения спектра, объясняющие различия образцов по ботаническому виду и обжарке и вносящие наибольший вклад в разделение образцов на группы. При помощи дискриминантного анализа разработана система классификационных функций градации образцов кофе по географическому месту произрастания. Таким образом, сочетание Фурье-ИК-спектроскопии с методами многомерного анализа можно использовать как быстрый и неразрушающий инструмент для идентификации зернового кофе.

Платова и соавторы [28] показали возможность применения UV-VIS-NIR спектроскопии в сочетании с многомерным анализом для градации пшеничной муки по группам, различающимся по технологическим свойствам. База данных спектров использована для построения классификационной модели градации пшеничной муки на группы качества сочетанием методов главных компонент и линейного дискриминантного анализа (PCA-LDA). Классификационная

модель, построенная на обучающей выборке, способна различать спектры пшеничной муки по группам качества с точностью 96,49 %.

PLS-DA (прямая классификация, выявление маркеров). В исследовании [29] для идентификации и анализа знаковых летучих органических соединений мускусной утки (*Cairina moschata*) разного возраста и пола (самка – 65, 70 и 75 дней; самец – 75, 80 и 75 дней) использовали PLS-DA. Этот метод полезен для визуализации многомерных данных и дискриминантного анализа потенциальных метаболитов, связанных с метаболическими изменениями. За независимые переменные приняли все летучие органические соединения в утке в соленом соусе по-нанкински. Группы одного и того же возраста сгруппированы вместе, а группы разного возраста более разбросаны. Сравнительный анализ базы данных HS-GC-IMS позволил установить 77 летучих органических соединений (21 спирт, 21 альдегид, 12 эфиров, 9 кетонов, 3 терпена, 2 фурана, 3 пиразина и 9 других соединений). Спирты и кетоны образуются в результате метаболизма сахаров, окисления липидов, декарбоксилирования и дегидрирования аминокислот. Распад ненасыщенных жирных кислот приводит к образованию альдегидов. После низкого порога обоняния эфиров они в первую очередь придают мясу желаемый фруктовый вкус, в то время как пиразины характеризируются специфическим привкусом выпечки. Различные химические компоненты для разных возрастов и полов в летучих органических соединениях в утке в соленом соусе по-нанкински проанализированы с помощью графика нагрузки, и в соответствии с интенсивностью пика каждого химического компонента была оценена степень вклада. Так, 32 летучих органических соединения из 77 внесли значительный вклад в состав образцов. По распределению и обилию этих 32 маркерных летучих органических соединений 80-дневный самец мускусной утки имел самые богатые вкусовые вещества.

В исследовании [30] анализировали способность портативных датчиков ближнего инфракрасного отражения (NIR) и Рамановской спектроскопии различать говядину, откормленную травой и зерном. С использованием PLS-DA было проанализировано 108 образцов говяжьих стейков, из них 54 образца – животные, откормленные травой, и 54 образца – животные, откормленные зерном. В результате установлено, что по спектрам NIR можно различать говядину, откормленную травой и зерном, как по жиру (91,7 %), так и по постному мясу (88,5 %). По Рамановским спектрам также наблюдалось различие говядины как по жиру (95,2 %), так и по постному мясу (69,6 %), но с менее точными результатами.

Pu *et al*. [31] провели профилирование белка MALDI-TOF MS четырех видов мяса (говядина, курица, утка и свинина) в сочетании с PLS-DA. Всего было собрано 103 образца чистого мяса и 81 образец смешанного. Свинину, курицу и утку выбрали для смешивания с говяжьим мясом в бинарной смеси в массовом процентном соотношении 0, 25, 50, 75 и 100 % для имитации говядины, фальсифицированной другими видами. Более того, образцы тройной смеси, содержащие 50 % говяжьего мяса, смешанного с различным процентным содержанием куриного мяса (50 к 0 %) и свиного мяса (0 к 50 %), использовались для исследования способности рассматриваемого подхода к дифференциации тройных смесей. PLS-DA применялся для выбора пиков признаков для различения четырех видов мяса, которые затем были идентифицированы с помощью базы данных белков (Uniprot). На основе линейной зависимости между интенсивностями пиков признаков регрессия с использованием PLS успешно применена для построения моделей прогнозирования для определения коэффициентов фальсификации смесей говяжьего мяса, содержащих один из трех других видов. Для оценки метода применены слепые тесты, достигнута средняя точность прогнозирования в 94,7 %.

PLS (подтверждение подлинности, аутентичности). Метленкин и др. [32] проанализировали применение методов ИК-спектроскопии в сочетании с хемометрическими методами для подтверждения подлинности (аутентичности) сливочного и растительно-сливочного масла. Для построения калибровочных моделей идентификации масел была сформирована база данных ИК-спектров (калибровочный и тестовый наборы), применены алгоритмы многомерной регрессии (регрессия на главные компоненты, проекция на латентные структуры), произведен выбор спектрального интервала и числа латентных переменных. Калибровочный набор составлен из 7 смесей сливочного и пальмового масла в различных концентрациях, тестовый набор – из 13 коммерческих образцов сливочного и растительно-сливочного масла. В процессе последовательного моделирования были разработаны калибровочные модели прогнозирования содержания пальмового масла. Модели отличались по спектральным интервалам и числу факторов (латентных переменных). При анализе спектральных данных выявлены наиболее интенсивные пики полос ИК-спектра (при 2928, 2851, 1740 и 1161 $см^{-1}$), связанные с наличием в образцах масла белковых и жировых связей и вносящие значительный вклад в дискриминацию образцов. Наиболее репрезентативная модель, полученная методом проекции на латентные структуры, включала два спектральных интервала (3110–2730, 1790–2600 $см^{-1}$) и отличалась высоким качеством (R^2(P) = 0,989) и точностью (RMSEP = 0,017). Проверка качества и точности модели осуществлялась посредством полной перекрестной кросс-валидации и тест-валидации коммерческих образцов. С помощью репрезентативной модели определили содержание пальмового масла в коммерческих образцах.

Методы машинного обучения. ANN (прогнозирование, классификация). В исследовании [33] ANN применялись для прогнозирования происхождения образцов

мяса на основе многоэлементных и изотопных значений, систематизированных в матрице экспериментальных данных. Входной слой ANN содержал 58 ед., соответствующих анализируемым переменным. Сеть имела один скрытый слой с пятью единицами без узла смещения. Функция активации этого слоя – гиперболический тангенс (than). Количество единиц выходного слоя – 2 (два класса классификации: румынский, зарубежный). Функция активации выходного слоя – нормализованная экспоненциальная (Softmax). Распределение образцов между этапами обучения, проверки и тестирования было 6:3:1. Общий процент классификации для этапов обучения, тестирования и проверки составил 94,7; 96 и 100 % соответственно. Наиболее эффективными параметрами, которые могли предсказать происхождение мяса и внесли наибольший вклад в модель, были δ^2H, δ^{13}C, Cs, Tb, Ir, Ce и Ti.

Tian *et al*. [34] использовали искусственные нейронные сети обратного распространения ошибок (BP-ANN) и модели опорных векторных машин для классификации яблок сорта Фуджи на больные и здоровые по спектрам ближнего ИК-диапазона. В модели BP-ANN в качестве передаточной функции скрытого слоя выбрана «tan-sigmod», в качестве передаточной функции выходного слоя – «purelin», а в качестве функции обучения – «trainlm». Параметр структуры сети определялся путем объединения эмпирических уравнений и множественных испытаний. Количество узлов входного слоя – 8, скрытого слоя – 8, выходного слоя – 1. Скорость обучения нейронной сети составляла 0,05, целевая ошибка – 10^{-6}, а максимальное количество обучений – 1000. Точность классификации на скорректированных спектрах была намного выше и составила 98,04 % для обучающего набора и 90,20 % для тестового.

Методы хемометрики широко применяют для анализа данных инфракрасной спектроскопии с целью аутентификации жиров и масел [35].

KNN. Для улучшения бактериальной классификации в исследовании [36] применяли метод машинного обучения KNN. Модель KNN с самой высокой точностью соответствовала уровню идентификации по Граму, т. е. позволяла определять семейство видов по Граму. Таким образом, если бактериальный вид, обнаруженный моделью, является Грам (–), остальные 25 видов по Граму (+) исключаются. На основе последнего результата предлагается список семейств и применяется другая модель KNN (на уровне семейства). Эта модель имела точность 95–98 %. Если семейство, определенное KNN, идентифицирует рассматриваемый штамм, он подтверждается. Кроме этого, модель рода KNN показала превосходную производительность классификации с процентом валидации 95,82 % для штаммов Gram (–) и 98,37 % для штаммов Gram (+). Однако, когда KNN применялся на уровне видов, точность классификации достигала только около 90 %. Это было связано с исключительно высоким уровнем сходства между штаммами, особенно в случае штаммов Gram (–).

KNN+RF+SVM. В работе [37] проводили классификацию нежелательных объектов с внешним видом и морфологией, схожими с ягодами годжи и трудно различимые методом KNN, SVM (support vector machine, метод опорных векторов), RF (random forest, случайный лес). Подготовили 250 образцов ягод годжи, собранных в Нинся-Хуэйском (автономный район Китая). Для исследования отобрано по 50 образцов каждого размера. Четыре типа инородных материалов в основном обнаружены во всех образцах: цветы, листья, ветки и кизил (другие плоды растений с морфологическими и цветовыми характеристиками, схожими с ягодами годжи). В результате классификации классификатор KNN показывал наилучшую производительность с точностью классификации 100 % и 100 % для проверочного и тестового наборов соответственно. Производительность классификации RF оказалась эффективнее, чем SVM, который ошибочно классифицировал волчью ягоду как кизил (1 раз). Точность на проверочной и тестовой выборке – 99,9 и 100 % соответственно. Классификатор SVM показывал наихудшие результаты идентификации среди всех. Точность 98,09 и 97,1 % соответственно на проверочной и тестовой выборках. Пять плодов кизила ошибочно классифицированы как волчья ягода, одна волчья ягода как цветок волчьей ягоды, тринадцать цветков волчьей ягоды как ветки волчьей ягоды, одна ветка волчьей ягоды как листья волчьей ягоды.

Количественный анализ посредством градуировочных моделей. Цель данного подхода – прогнозирование численных значений (концентрация, доля примеси, срок годности).

PLS (*построение моделей «структура-свойство»*). Logan *et al*. [38] для классификации говяжьих туш из любой точки Австралии с учетом различных пород крупного рогатого скота, различных кормов и качества пастбищ использовали PLS-DA. Оценили 960 говяжьих туш из северных и южных регионов путем изучения подкожного жира. Туши из четырех различных систем производства в каждом регионе оценили с помощью Рамановской спектроскопии и состава жирных кислот для разработки моделей, которые наилучшим образом классифицировали различные системы производства. В результате разработано 12 моделей PLS-DA. Двухклассовая модель, основанная на составе жирных кислот, смогла верно классифицировать 99 % животных, питавшихся травой и зерном. Лучшая модель спектроскопии Рамана правильно классифицировала 94 % туш из северного региона, питавшихся травой и зерном. Для южного региона производства модели имели следующую точность классификации: долгосрочный откорм зерном (98 %); краткосрочный откорм зерном (95 %); откорм травой (96 %); откорм травой с добавкой (97 %). Кроме того, модель для южного региона классифицировала траву

против зерна (97 %). Для северного региона производства модели имели следующую точность классификации: долгосрочный откорм зерном – 59 %; краткосрочный откорм зерном – 77 %; откорм травой – 80 %; откорм травой с добавкой – 92 %.

Исследование [31] также можно отнести к данному подходу. Авторы определяли долю фальсификата в мясных смесях (0–100 %) с точностью 94,7 %.

Амелин и др. [39] предложили бесконтактный способ определения массовой доли молочного жира в бутилированном молоке по диффузному отражению излучения от светодиодов с длинами волн излучения 365, 390, 850 и 880 нм. Содержание молочного жира в анализируемых пробах молока оценивали, используя алгоритм многомерной градуировки данных – частичную регрессию наименьших квадратов. Относительное стандартное отклонение результатов анализа не превышало 0,08.

Машинное обучение. ANN (*получение регрессионных моделей для количественных прогнозов*). Потенциал для прогнозирования параметров качества яблок по спектрам NIR [34] также можно отнести к данному подходу.

KNN+RF. Feng *et al*. [40] в своем исследовании проводят классификацию методами KNN, RF и PLS-DA трех видов рыб (минтая, угольной рыбы, арктического клыкача). Ни одна из моделей классификации не достигла 100 % по всем четырем оцененным индексам. Классификатор RF достиг более 90 % по каждой метрике. Классификатор KNN дал неоптимальные результаты, т. к. точность составила 80 %. Результаты классификации PLS-DA и KNN неудовлетворительны – из 237 образцов правильно идентифицировали 181 и 201 образцов соответственно. В модели PLS-DA 7 образцов минтая из 12 были неправильно классифицированы. Два из них определены как угольная рыба, а остальные пять как арктический клыкач. 5 образцов угольной рыбы из 13 неверно классифицированы как минтай, 7 как арктический клыкач. Треть предсказанных образцов из 17 неверно отнесли арктического клыкача к минтаю, а остальные образцы – к угольной рыбе. В классификаторе KNN 62 образца были неправильно классифицированы. В классе минтая, угольной рыбы и арктического клыкача было 18, 25 и 21 неправильной классификации. Классификатор RF неправильно классифицировал только 12 образцов, что является выдающимся достижением с точностью 95,06 %, правильностью 93,10 %, полнотой 98,18 % и оценкой F1 95,57 %. Таким образом, классификатор RF является наиболее подходящей моделью для классификации минтая и показывает степень производительности лучше, чем традиционные методы. Это связано с тем, что по сравнению с PLS-DA и KNN модель RF может автоматически удалять выбросы во время кластеризации и не демонстрирует переобучения, что приводит к лучшей стабильности и чувствительности.

Для визуализации и оценки результатов идентификации и классификации эффективно используются следующие сочетания методов: электронный нос / язык + ANN в классификации сортов кофе, чая, сыров и т. д.; УФ-видимая спектроскопия + *k*-means в разделении мяса по степени свежести; масс-спектрометрия (MALDI-TOF) + RF в идентификации микробных загрязнений (например, плесень в зерне); Рамановская спектроскопия + PCA + LDA (линейный дискриминантный анализ) в установлении подлинности продукта (например, отличие натурального меда от искусственного, натурального растительного масла).

Используемые методы позволяют получить объективные решения, исключив человеческий фактор при оценке; выявлять скрытые закономерности (например, корреляция между спектральными данными и географическим происхождением); раннее обнаружение порчи (например, прогнозирование срока годности с помощью регрессионных моделей).

Опираясь на анализ приведенной литературы и собственные исследования, можно заключить, что, по мнению авторов, универсального инструмента для всех случаев аналитики не существует. Однако, для обработки многомерных данных многие исследователи отдают предпочтение использованию спектроскопии / хроматографии – PCA / PLS и HCA.

Методы хемометрики оказали свою эффективность при обработке данных с нечеткими результатами. Метод Рамановской спектроскопии – наглядное подтверждение этому заключению. Метод широко используется в химической промышленности и относительно недавно начал применяться при анализе пищевых продуктов. В таблице 2 представлены направления исследований Рамановской спектроскопии в сочетании с методами хемометрики.

В исследовании [41] определяли содержание глюкозы, фруктозы, сахарозы и мальтозы в различных образцах меда. Использовались Рамановские спектры, полученные из 40 модельных смесей и 90 образцов меда. Собранные данные как из приготовленных сахарных смесей, так и из медовых растворов обработаны с помощью PCA, PLS и ANN для разработки моделей прогнозирования в попытке достичь многокомпонентный количественный анализ в сложных смесях. Результаты сравнивали с результатами ВЭЖХ в качестве эталонного метода. Модели / обученные сети созданы с использованием набора калибровочных данных и оценены с использованием набора проверочных данных. Значения коэффициента корреляции между фактическими и прогнозируемыми значениями следующих составляющих: глюкозы, фруктозы, сахарозы, а также мальтозы определены как 0,964; 0,965; 0,968 и 0,949 для PLS и 0,965; 0,965; 0,978 и 0,956 для ANN соответственно.

Szykuła *et al*. [59] использовали PCA и PLS-DA в сочетании с Рамановской спектроскопией для межвидовой и внутривидовой классификации образцов

Таблица 2. Использование Рамановской спектроскопии

Table 2. Raman spectroscopy in food science

Хемометрический метод	Направление исследований	Источник
Классификация и дискриминация		
PLS-DA, LDA	Дифференциация говядины травяного откорма от говядины зернового откорма	[30]
PCA, PLS-DA	Классификация говяжьих туш из любой точки Австралии с учетом различных пород крупного рогатого скота, различных кормов и качества пастбищ	[38]
PCA, FDA, KNN, CNN	Идентификация бактерий в пищевой промышленности	[36]
PCA, PLS-DA, SVM	Видовая идентификация красного мяса (говядина, оленина, баранина)	[53]
Количественный анализ посредством градуировочных моделей		
PLSR, BP-ANN	Оценка кислотности молока и идентификация фальсификации молока	[17]
PCA, PLS, ANN	Определение содержания глюкозы, фруктозы, сахарозы и мальтозы в различных образцах меда	[41]
PLS	Определение жирных кислот в свином шпике	[61]
PLS-DA, PCA	Контроль температуры термической обработки свинины	[42]
PLS-DA, PCA	Прогнозирование pH свинины	[43]
PLSR	Прогнозирование pH и потери влаги в свинине	[44]
PLSR	Прогнозирование ВУС и pH у свиней *longissimus lumborum*	[45]
PLSR	Оценка нежности говядины	[46]
PLS-DA	Выявление фальсификации говядины каррагинаном и солью	[47]
PCA, PLSR	Прогнозирование текстурных характеристик говядины при замораживании и размораживании	[48]
PLSR	Определение органолептических характеристик говядины разных пород и возрастов	[49]
PCA	Определение типа откорма по содержанию жирных кислот в говядине	[50]
PLS-DA, PLSR	Прогнозирование физико-химических показателей говядины	[51]
PLSR	Прогнозирование органолептических показателей говядины	[52]
PLSR и линейная регрессия	Определение внутримышечного жира и основных групп жирных кислот в баранине	[54]
PLSR	Определение технологических свойств баранины (усилие сдвига, потери при варке)	[55–57]
PLSR	Определение свежести баранины в процессе хранения	[58]

мяса по профилям жировой ткани. Применение метода PCA показало четкое разделение между образцами свинины, баранины и курицы. Лучшее разделение классов наблюдалось для первой главной компоненты (объясняет 78,4 % общей дисперсии) и второй главной компоненты (объясняет 12,1 % общей дисперсии).

В исследовании [60] также изучали возможности PCA и Рамановской спектроскопии для классификации козьего, коровьего и буйволиного жира по ряду показателей: концентрация бета-каротина, жирных кислот, липидов, конъюгированной линолевой кислоты (CLA) и витамина D. График оценок показал, что 51 % дисперсии вносил PC1 и 10 % – PC2. При этом между коровьим жиром и жирами буйвола и козы наблюдались достоверные отличия, в то же время между жирами буйвола и козы статистически значимых различий в содержании изучаемых веществ не выявлено.

Berhe *et al*. [61] изучали модели PLS для прогнозирования отдельных жирных кислот на основе спектров Рамана свиного шпика. Для извлечения информации о вариациях в наборе данных выполнили метод главных компонент, который определил, что существуют различия между внешним и внутренним слоями жира. Графики, основанные на средних спектрах образцов (внутренний + внешний слой жира), продемонстрировали их разделение на основе йодного числа. В результате получены модели PLS с корреляцией от 0,78 до 0,90 между спектрами Рамана, показателями йодного числа, SFA, MUFA и PUFA.

Метод PCA применяли для классификации 300 туш крупного рогатого скота с разным откормом (травой и зерном) [62]. Полученная диаграмма рассеивания включала два кластера: животные, содержавшиеся на зерновом и травяном откормах.

Robert *et al*. [53] проанализировали данные Рамановской спектроскопии 90 образцов красного мяса (говядины, ягнятины и оленины) методами PCA, SVM и PLSDA. Две главные компоненты объясняли 59 % дисперсии по образцам мяса. График оценок PCA продемонстрировал, что говядина, оленина и баранина отчетливо разделялись друг от друга. Разделение вдоль оси PC2 связано с липидами: сигнал 911 $см^{-1}$ более интенсивный в образцах ягненка, образцы говядины формировали кластеры в отрицательном пространстве PC1, демонстрируя более сильные полосы амида III при 1267–1316 $см^{-1}$.

В исследовании [63] изучали качество мяса по таким предикторам, как гликоген, глюкоза, лактат и кортизол. PCA показал четкое разделение образцов на четыре отдельные группы и выявил взаимосвязь гликогена, глюкозы и лактата.

Abbas *et al*. [64] сравнили Рамановские спектры жиров птицы, свинины, говядины, баранины и рыбьего жира с использованием PCA. Общая вариация дисперсии составила 91 % (PC1 = 67 %, PC2 = 24 %), при этом получено четкое разделение образцов рыбьего, птичьего, свиного и говяжьего жиров. Образцы ягненка были близки к говяжьим, что объяснимо сходством их составов.

В [65] применяли Рамановскую спектроскопию с PCA для классификации семи видов мяса и салями из них. В результате анализа было сформировано четыре кластера: A1 включал образцы крупного рогатого скота, овец и коз; A2 – образцы свиней и буйволов; A3 – образцы птицы; A4 – образцы рыбы.

Lyndgaard *et al*. [66] применили PCA к спектрам Рамана свиной жировой ткани для различения жировых слоев (внешнего и внутреннего) и оценки изменения состава жирных кислот в зависимости от глубины жира и жирового слоя. На графике PCA заметно почти полное разделение жировых слоев вдоль первого главного компонента, который описывает 79 % общей спектральной вариации, что позволило авторам предложить свой подход для быстрой сортировки свиных туш.

В исследовании [67] также применили PCA для классификации животных жиров по данным Рамана в ближнем инфракрасном (FT-Raman, λex ~ 1064 нм) и видимом диапазонах (vis-Raman, λex ~ 532 нм). Полное разделение животных жиров разных видов указывало на то, что характеристики образцов существенно различаются и обладают значительным потенциалом для идентификации происхождения. С помощью хемометрического анализа заключили, что vis-Raman обладает лучшей способностью дифференциации животных жиров по сравнению с FT-Raman.

В исследовании [68] примененили random frog-PLS (RF-PLS) для модели прогнозирования пропорций миоглобина (дезоксимиоглобина и оксимиоглобина). Авторы получили результаты для дезоксимиоглобина R_p = 0,8936 и RMSEP = 2,91; для оксимиоглобина R_p = 0,9762 и RMSEP = 1,23.

Инструменты хемометрики в сочетании с Рамановской спектроскопией в том числе использовали для прогноза органолептических и функционально-технологических показателей. Модель на основе PLSR при использовании диапазона частот комбинационного рассеяния 1300–2800 см$^{-1}$ образцов говядины продемонстрировала эффективность от умеренной до высокой (R_{CV}^2 = 0,50–0,84; RMSECV = 1,31–9,07) для комплекса органолептических показателей, а при сужении области интереса только до вкусовых характеристик – высокую эффективность (R_{CVS}^2 = 0,80–0,84; RMSECVs = 4,21–4,65) [69].

Andersen *et al*. разработали модель PLSR для скринингового анализа потерь мясного сока и pH свинины с использованием спектров Рамана и *Longissimus lumborum* [70]. Результаты модели составили для потери мясного сока R_{CV}^2 = 0,75; RMSECV = 1,27 % и RPD = 2,0; для показателя pH – R_{CV}^2 = 0,72; RMSECV = 0,05 и RPD = 2,0.

Исследование [71] показало, что с помощью PCA для анализа спектров Рамана можно различать образцы молока с лактозой и без нее, прошедшие различные термические процессы, и определять активность пептидазы (*Pseudomonas* sp.) в процессе хранения и прогнозировать стабильность молочной пены путем ее корреляции с концентрацией свободных жирных кислот. Применение PCA в сочетании с Рамановской спектроскопией оказалось полезным методом анализа для быстрого и чувствительного определения фагов и антибиотиков в сыром молоке по сравнению с традиционными методами анализа, основанными на микробном ингибировании. Присутствие фага обнаруживалось с титром 10^7 КОЕ/мл, а антибиотика в концентрации 0,5 мкг/мл [72].

Rodrigues Júnior *et al*. [73] применяли многомерный анализ данных спектроскопии на основе PCA и PLS-DA для классификации образцов сухого молока (цельнолактозного и низколактозного), фальсифицированных мальтодекстрином (2,5–50,0 % по весу). Полученные модели PLS-DA позволили правильно классифицировать все образцы со специфичностью 100,00 % и чувствительностью 98,58 %, согласно ROC-кривой.

Taylan *et al*. [74] предложили методологию обнаружения и количественного определения жира в масле на основе спектроскопии Рамана, иерархического кластерного анализа (HCA), анализа главных компонентов (PCA), регрессии с использованием частично наименьших квадратов и регрессии главных компонентов. Значения R^2 = 0,99 получены при перекрестной проверке разработанных методов PLSR и PCR.

Пространственно-смещенную Рамановскую спектроскопию (SORS) и PLSR использовали для количественной оценки фальсификации сливочного масла маргарином через упаковку [75]. Коэффициенты корреляции 0,95 и 0,92, связанные с ошибкой прогнозирования 3,2 и 3,9 % соответственно, получены для двух разных типов упаковки. При этом авторы применили усреднение спектров, собранных для одного образца, чтобы минимизировать отношение сигнал:шум.

В исследовании [76] использовали корреляционный анализ Пирсона для подтверждения взаимосвязи между сигналом 1657 см$^{-1}$ и содержанием полиненасыщенных жирных кислот (r > 0,98) и линоленовой кислоты (r > 0,97) в сливочном масле.

Спектры Рамана оценивались с помощью частичного дискриминанта наименьших квадратов (PLS-DA) и PLS для определения происхождения жира / масла

и соотношений фальсификации образцов белого и ультрафильтрованного сыра. Коэффициенты определения и пределы обнаружения для фальсификации маргарином, кукурузным и пальмовым маслом составили 0,990; 0,993; 0,991 и 3,30; 3,36 и 3,59 % для двух видов сыров соответственно [77].

В исследовании [78] выполнен количественный анализ жира, лактозы и белка в йогуртах моделями частичных наименьших квадратов и данных Рамановской спектроскопии. Стандартные ошибки прогнозирования для коммерческих образцов составили 3,2–3,9 %.

Анализ главных компонентов позволил успешно классифицировать образцы молочных сливок и йогуртов с включениями посторонних растительных жиров и масел (кукурузного и подсолнечного) [79]. Рамановские спектры, полученные при более высоких температурах, более интенсивны, а ферментация йогурта оказывает влияние на Рамановское рассеяние и последующую кластеризацию образцов с помощью PCA из-за липолиза и образования новых продуктов.

Определение меламина в сухом молоке с использованием портативного спектрометра Рамана и метода частичных наименьших квадратов (PLS) показало предел обнаружения 0,13 % [80]. PCA позволил дифференцировать фальсифицированные образцы при концентрациях > 1,0 % для сухого смешивания и > 0,30 % для образцов влажного смешивания, а мягкое независимое моделирование аналогии классов (SIMCA) для тех же образцов – ≥ 0,5 и 0,30 % соответственно [81].

Сочетание Рамановской спектроскопии с SIMCA продемонстрировало хорошую классификацию козьего и коровьего молока и их бинарных смесей, а метод PLS успешно использовали для прогнозирования концентрации коровьего молока в козьем с показателем R^2 калибровки 0,97 и R^2 проверки 0,98 [82].

Поверхностно-усиленную Рамановскую спектроскопию с анализом PLS применяли для извлечения и количественного обнаружения тиабендазола на поверхности яблок [83].

В исследовании [84] для анализа деградации каротиноидов в процессе сушки применяли PCA спектров картофеля. Наилучшая линейная корреляция была достигнута для образцов, нагретых горячим воздухом, R^2 = 0,90, а в микроволновой печи R^2 = 0,88. Также построили модели PLS, получившие удовлетворительный коэффициент детерминации.

Регрессионная модель на основе PLSR спектров Рамана, разработанная для количественного анализа концентрации каротиноидов в томатах, продемонстрировала хорошие результаты – R^2 = 0,94 [85]. Лазер с длиной волны 785 нм является наиболее подходящим для этих целей, чем 532 нм и 1064 нм. В дальнейшем исследовании [86] оптимизировали время экспозиции при записи спектров. Точность модели PLSR была выше (R^2 = 0,87), когда спектры получали в течение 10 с, но снижалась с уменьшением времени экспозиции (R^2 = 0,69 для 0,7 с). На точность модели PLS-DA время не оказывало влияния (процент определения 90 %). Таким образом, Рамановская спектроскопия в сочетании с PLS-DA является перспективным инструментом анализа каротиноидов во фруктах и овощах.

Mandrile *et al*. [87] оценили возможность Рамановской спектроскопии в сочетании с PLS-DA для мониторинга заражения томатов двумя вирусными патогенами (вирусом желтой курчавости листьев и вирусом пятнистого увядания). Разработанная модель позволила отличить здоровые образцы от инфицированных с точностью > 70 % через 14 дней после заражения для первого вируса и > 85 % через 8 дней для второго. При этом авторы выявили спектральные различия в зараженных образцах, что говорит о возможности идентификации возбудителя.

Сочетание методов самомоделирования смеси (SMA), спектральной дивергенции информации (SID) и PLSR применили для обнаружения изменений в танине граната с целью контроля зрелости плодов (R^2 > 0,92) [88].

Использование OPLS-DA портативного Рамановского спектроскопа позволило выявить инфицированные цитрусовые деревья (болезнь Huanglongbing, вызываемая бактерией *Candidatus Liberibacter* spp.) с точностью ~ 98 % для грейпфрутов и ~ 87 % для апельсиновых деревьев, а точность определения ранней и поздней стадии заражения составила 100 % для грейпфрутов и ~ 94 % для апельсинов [89].

Фальсификация растительных масел чаще всего включает замену дорогостоящего масла более дешевым, включение в пищевое непищевых масел, смешивание низкосортного и высококачественного [90]. При анализе масел методом Рамановской спектроскопии основные различия заключались в количестве и пропорции структур с двойной связью [91, 92].

Классификации различных видов масел на основе корреляции данных Рамановской спектроскопии и степени ненасыщенности йодным числом и содержанием каротиноидов посвящен ряд работ [93, 94]. Полученные спектральные данные обычно анализировали статистически с применением методов PCA, CA, PLS и другими хемометрическими методами [95, 96].

В исследовании [97] разработали калибровочные модели с частичной регрессией методом наименьших квадратов (PLSR) для определения примеси обычного оливкового масла в оливковом масле первого отжима (EVOO). Модель дала стандартную ошибку прогнозирования (SEP) 1,34 % и коэффициент корреляции прогнозирования 0,99. Кроме того, значение остаточного прогнозирующего отклонения (RPD) составило 5,71, что указывает возможность использования разработанной модели для рутинного контроля качества.

Georgouli *et al*. [98] для выявления фальсификации EVOO применили алгоритм проекций с сохранением локальности по классам (CLPP) в сочетании с моде-

лью классификации *k*-ближайшего соседа (KNN), получив точность классификации 80 % с четырьмя классами. Обнаружение и количественное определение примеси соевого масла в оливковом масле первого отжима методом регрессии наименьших квадратов (OLS) на основе отношения интенсивности I_{1266}/I_{1440} спектров Рамана показало высокую линейность с R_c^2 и R_p^2 0,9769 и 0,9450; RMSEC и RMSEP 1,445 и 1,975 % (об./об.) соответственно [99].

Модель PLS с дискриминантным анализом применяли для классификации оливкового масла по географическому происхождению, году сбора урожая и сорту оливок, получив более 84,0 % верной классификации [100].

В исследовании [101] использовали алгоритмы машинного обучения для обработки данных Рамановской спектроскопии с целью проверки подлинности пищевых растительных масел (из кунжута, конопли, грецкого ореха, льна, тыквы и облепихи). Подход был основан на сборе спектров масел и создании обучающего набора данных, которые не требуют специальной или предварительной обработки, и их анализе в приложении Classification learner для создания наиболее релевантной модели классификации. Авторам удалось не только обнаружить фальсификацию масел, но и провести ее количественную оценку. Например, для образца масла с 80 % облепихового и 20 % подсолнечного соотношение между двумя типами масел не соответствовало заявленному: подсолнечное масло присутствовало в гораздо большем процентном соотношении.

Jiang *et al*. [102] предложили количественный метод определения кислотного числа пищевого масла во время хранения на основе спектральных характеристик Рамана и методов мягкой усадки bootstrap (BOSS), анализа популяции переменной комбинации (VCPA), основанных на стратегии анализа популяции модели (MPA). Модель VCPA-SVM показала наилучшие результаты: R_p^2 и RMSEP в наборе прогнозов составили 0,932 и 0,153 соответственно.

Хемометрика, основанная на регрессии опорных векторов (SVR), использовалась для количественного анализа β-каротина в синтетических оливковых маслах. Показатели оценки тестового набора линейного ядра SVR составили RMSE = 0,0653; R^2 = 0,9868 [103].

Для определения качества пищевого масла в исследовании [104] применили девять алгоритмов контролируемого машинного обучения (ML). Рамановские спектры десяти коммерческих пищевых масел проанализировали с помощью контролируемых алгоритмов ML и сравнили с моделью PCA. Модель ML показала точность классификации 96,7 % при определении типа масла и прогноза фальсификации (R^2 составил 0,984).

Выводы

Несмотря на то, что раздел химии хемометрика появился в 1970 гг., хемометрические методы в анализе сложных пищевых систем распространились в начале 2000 гг. Из всего разнообразия хемометрических методов наиболее востребованным является PCA. Анализ научных публикаций показал, что для каждого вида пищевой продукции лучше использовать не один метод, а их сочетание. Методы классификации в каждом отдельном случае показывают разные результаты.

Хемометрические и инструментальные методы взаимно усиливают друг друга. Спектроскопия / хроматография требуют применение методов PCA / PLS для обработки многомерных данных. Масс-спектрометрия использует кластеризацию для группировки сложных спектров. Сенсоры сочетаются с алгоритмами машинного обучения (ML) для классификации в реальном времени.

В пищевой промышленности хемометрические методы чаще применяются для контроля состава (жиры, белки, витамины); обнаружения фальсификаций; управления технологическими процессами (например, ферментация).

Таким образом, хемометрические методы дополняют инструментальные, решая следующие задачи: предобработка данных (нормализация, фильтрация шумов); извлечение признаков (например, PCA для спектров); классификация и калибровка (PLS для количественного анализа в ИК-спектроскопии); интерпретация сложных данных (кластеризация масс-спектров).

ИК-спектроскопию совместно с PCA применяют для визуализации кластеров образцов. ГХ-МС и HCA используют для группировки соединений по масс-спектрам; ЖХ и PLS – для прогнозирования концентраций веществ; электрохимические сенсоры и SVM – для классификации примесей.

Сочетание инструментальных и хемометрических методов не только улучшает точность анализов, но и трансформирует подходы к управлению качеством для обеспечения устойчивого производства в пищевой промышленности.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

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

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Wold S. Spline functions, a new tool in data analysis. Kemisk Tidskrift. 1972;84(3):34–37.

2. Wold S. Chemometrics; What do we mean with it, and what do we want from it? Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 1995;30(1):109–115. https://doi.org/10.1016/0169-7439(95)00042-9

3. Wold S, Esbensen K, Geladi P. Principal component analysis. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 1987;2(1–3):37–52. https://doi.org/10.1016/0169-7439(87)80084-9

4. Wold S, Sjöström M, Eriksson L. PLS-regression: A basic tool of chemometrics. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2001;58(2):109–130. https://doi.org/10.1016/s0169-7439(01)00155-1

5. Wold S. Cross-validatory estimation of the number of components in factor and principal components models. Technometrics. 1978;20(4):397–405. https://doi.org/10.2307/1267639

6. Geladi P, Kowalski BR. Partial least-squares regression: A tutorial. Analytica Chimica Acta. 1986;185:1–17. https://doi.org/10.1016/0003-2670(86)80028-9

7. Chemometrics: Mathematics and Statistics. In: Kowalski BR, editor. NATO ASI series. Series C, mathematical and physical sciences. Dordrecht: Reidel Publ.Co.; 1984; vol. 138. 485 p.

8. Massart DL, Vandeginste BGM, Buydens LMC, de Jong S, Lewi PJ, *et al*. Handbook of Chemometrics and Qualimetrics. Amsterdam: Elsevier Science; vol. 20A. 867 p.

9. Родионова О. Е., Померанцев А. Л. Хемометрика: достижения и перспективы. Успехи химии. 2006. Т. 75. № 4. С. 302–321. [Rodionova OYe, Pomerantsev AL. Chemometrics: Achievements and prospects. Uspekhi khimii. 2006;75(4):302–321. (In Russ.)] https://elibrary.ru/HSQIRD

10. Родионова О. Е. Хемометрический подход к исследованию больших массивов химических данных. Российский химический журнал. 2006. Т. 50. № 2. С. 128–144. [Rodionova OYe. Chemometric approach to big data in chemistry. Russian Journal of General Chemistry. 2006;50(2):128–144. (In Russ.)] https://elibrary.ru/HTUUSZ

11. Peris-Díaz MD, Krężel A. A guide to good practice in chemometric methods for vibrational spectroscopy, electrochemistry, and hyphenated mass spectrometry. Trends in Analytical Chemistry. 2021;135:116157. https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116157

12. Paula AM, Conti-Silva AC. Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses on extruded snacks. Journal of Food Engineering. 2014;121:9–14. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.007

13. Dhanapal L, Erkinbaev C. Portable hyperspectral imaging coupled with multivariate analysis for real-time prediction of plant-based meat analogues quality. Journal of Food Composition and Analysis. 2024;126:105840. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105840

14. Xiao L, Qi L, Fu R, Nie Q, Zhang X, *et al*. A large-scale comparison of the meat quality characteristics of different chicken breeds in South China. Poultry Science. 2024;103(6):103740. https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103740

15. Toscas PJ, Shaw FD, Beilken SL. Partial least squares (PLS) regression for the analysis of instrument measurements and sensory meat quality data. Meat Science. 1999;52(2):173–178. https://doi.org/10.1016/S0309-1740(98)00165-X

16. Araújo JC, Lima ACS, Nunes MPM, Sousa MAP, Serrão GX, *et al*. Relationships among carcass shape, tissue composition, primal cuts and meat quality traits in lambs: A PLS path modeling approach. Small Ruminant Research. 2020;182:52–66. https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.106024

17. Huang W, Fan D, Li W, Meng Y, Liu TC. Rapid evaluation of milk acidity and identification of milk adulteration by Raman spectroscopy combined with chemometrics analysis. Vibrational Spectroscopy. 2022;123:103440. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103440

18. Zhilinskaya NV, Sarkisyan VA, Vorobieva VM, Vorobieva IS, Kochetkova AA, *et al*. Development of a marmalade for patients with type 2 diabetes: Sensory characteristics and acceptability. Food Science and Technology International. 2018;24(7):617–626. https://doi.org/10.1177/1082013218779748

19. Deegan KC, Holopainen U, McSweeney PLH, Alatossava T, Tuorila H. Characterisation of the sensory properties and market positioning of novel reduced-fat cheese. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2014;21:169–178. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.10.003

20. Li F, Lu Y, He Z, Yu D, Zhou J, *et al*. Analysis of carcass traits, meat quality, amino acid and fatty acid profiles between different duck lines. Poultry Science. 2024;103(7):103791. https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103791

21. Liu Y, Yang X, Wu S, Degen A, Huan X, *et al*. Identifying meat from grazing or feedlot yaks using visible and near-infrared spectroscopy with chemometrics. Journal of Food Protection. 2024;87(7):100295. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100295

22. Maritha V, Harlina PW, Musfiroh I, Muchtaridi M, Rafi M, *et al*. Lipidomics analysis for halal authentication of *Triceps brachii*, *Longissimus dorsi*, and *Biceps femoris* meats: Profiling the lipid composition. LWT. 2023;185:115187. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115187

23. Amelin VG, Emelyanov OE, Tretyakov AV, Kish LK. Identification and detection of adulterated butter by colorimetry and near-IR-spectroscopy. Journal of Applied Spectroscopy. 2024;91:826–834. https://doi.org/10.1007/s10812-024-01790-0

24. Амелин В. Г., Шаока З. А. Ч., Большаков Д. С. Идентификация и аутентификация сухого коровьего молока с использованием смартфона и хемометрического анализа. Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2023. Т. 64. № 1. С. 49–59. [Amelin VG, Shogah ZACh, Bolshakov DS. Identification and authentication of cow's milk powder using a smartphone and chemometric analysis. Moscow University Chemistry Bulletin. Series 2: Chemistry. 2023;64(1):49–59. (In Russ.)] https://doi.org/10.55959/MSU0579-9384-2-2023-64-1-49-59

25. Платов Ю. Т., Бобожонова Г. А., Метленкин Д. А. Спектроколориметрический метод идентификации гречневой крупы. Хлебопечение России. 2020. № 1. С. 24–28. [Platov YuT, Bobozhonova GA, Metlenkin DA. Spectrocolorimetry in buckwheat identification. Bakery of Russia. 2020;(1):24–28. (In Russ.)] https://elibrary.ru/MXAOOU

26. Platov YuT, Metlenkin DA, Platova RA, Rassulov VA, Vereshchagin AI, *et al*. Buckwheat identification by combined UV-VIS-NIR spectroscopy and multivariate analysis. Journal of Applied Spectroscopy. 2021;88(4):723–730. https://doi.org/10.1007/s10812-021-01231-2

27. Метленкин Д. А., Платов Ю. Т., Платова Р. А., Рубцов А. Е., Михайлова А. М. Идентификация кофе в зернах методами Фурье-ИК-спектроскопии и многомерного анализа. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2021. № 5–6. С. 92–97. [Metlenkin DA, Platov YuT, Platova RA, Rubtzov AE, Mikhaylova AM. Identification of coffee beans using ftir-spectroscopy and multivariate analysis. Izvestiya vuzov. Food Technology. 2021;(5–6):92–97. (In Russ.)] https://doi.org/10.26297/0579-3009.2021.5-6.17

28. Платова Р. А., Жиркова Е. В., Метленкин Д. А., Лысенкова А. А., Платов Ю. Т. и др. Прогнозирование технологических свойств пшеничной муки сочетанием методов UV-VIS-NIR спектроскопии и многомерного анализа. Пищевые системы. 2024. Т. 7. № 1. С. 22–30. [Platova RA, Zhirkova EV, Metlenkin DA, Lysenkova AA, Platov YuT, *et al*. Prediction of technological properties of wheat flour by combination of UV-VIS-NIR spectroscopy and multivariate analysis methods. Food Systems. 2024;7(1):22–30. (In Russ.)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-22-30

29. Zhu Z, Bassey AP, Cao Y, Du X, Huang T, *et al*. Meat quality and flavor evaluation of Nanjing water boiled salted duck (NWSD) produced by different Muscovy duck (*Cairina moschata*) ingredients. Food Chemistry. 2022;397:133833. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133833

30. Coombs CE, Liddle RR, González LA. Portable vibrational spectroscopic methods can discriminate between grass-fed and grain-fed beef. Journal of Near Infrared Spectroscopy. 2021;29(6):321–329. https://doi.org/10.1177/09670335211049506

31. Pu K, Qiu J, Li J, Huang W, Lai X, *et al*. MALDI-TOF MS protein profiling combined with multivariate analysis for identification and quantitation of beef adulteration. Food Analytical Methods. 2023;16:132–142. https://doi.org/10.1007/s12161-022-02403-2

32. Метленкин Д. А., Платов Ю. Т., Рубцов А. Е. Идентификация сливочного масла методами ИК-спектроскопии и многомерного анализа. Пищевая промышленность. 2020. № 3. С. 58–61. [Metlenkin DA, Platov YuT, Rubtzov AE. Identification of butter using IR spectroscopy and multivariate analysis. Food Industry. 2020;(3):58–61. (In Russ.)] https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10033

33. Cristea G, Voica C, Feher I, Puscas R, Magdas DA. Isotopic and elemental characterization of Romanian pork meat in corroboration with advanced chemometric methods: A first exploratory study. Meat Science. 2022;189:108825. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108825

34. Tian S, Zhang J, Zhang Z, Zhao J, Zhang Z, *et al*. Effective modification through transmission Vis/NIR spectra affected by fruit size to improve the prediction of moldy apple core. Infrared Physics and Technology. 2019;100:117–124. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.05.015

35. Rohman A, Ghazali MAB, Windarsih A, Irnawati, Riyanto S, *et al*. Comprehensive review on application of FTIR spectroscopy coupled with chemometrics for authentication analysis of fats and oils in the food products. Molecules. 2020;25(22):5485. https://doi.org/10.3390/molecules25225485

36. Dib OH, Assaf A, Grangé E, Morin JF, Cordella CBY, *et al*. Automatic recognition of food bacteria using Raman spectroscopy and chemometrics: A comparative study of multivariate models. Vibrational Spectroscopy. 2023;126:103535. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2023.103535

37. Hu X, Ma P, He Y, Guo J, Li Z, *et al*. Nondestructive and rapid detection of foreign materials in wolfberry by hyperspectral imaging combing with chemometrics. Vibrational Spectroscopy. 2023;128:103578. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2023.103578

38. Logan BG, Hopkins DL, Schmidtke LM, Fowler SM. Assessing chemometric models developed using Raman spectroscopy and fatty acid data for Northern and Southern Australian beef production systems. Meat Science. 2022;187:108753. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108753

39. Амелин В. Г., Емельянов О. Э., Шаока З. А. Ч., Третьяков А. В. Определение массовой доли молочного жира в бутилированном молоке бесконтактным цветометрическим методом. Журнал аналитической химии. 2024. Т. 79. № 11. С. 1147–1153. [Amelin VG, Emelyanov OE, Shaoka ZACh, Tratyakov AV. Determination of the mass fraction of milk fat in bottled milk by non-contact colorimetric method. Zhurnal analiticheskoi khimii. 2024;79(11):1147–1153. (In Russ.)] https://elibrary.ru/SXOHRV

40. Feng S, Qi S, Chen C, Khan IM, Gu Q, *et al*. Classification and quantification of adulterants in Alaska pollock based on fourier transform near-infrared spectroscopy with chemometrics. Food Bioscience. 2024;59:104003. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104003

41. Özbalci B, Boyaci İH, Topcu A, Kadılar C, Tamer U. Rapid analysis of sugars in honey by processing Raman spectrum using chemometric methods and arti-ficial neural networks. Food Chemistry. 2013;136(3–4):1444–1452. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.064

42. Berhe DT, Eskildsen CE, Lametsch R, Hviid MS, van den Berg F. Prediction of total fatty acid parameters and individual fatty acids in pork back fat using Raman spectroscopy and chemometrics: Understanding the *cage of covariance* between highly correlated fat parameters. Meat Science. 2016;111:18–26. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.08.009

43. Berhe DT, Lawaetz AJ, Engelsen SB, Hviid MS, Lametsch R. Accurate determination of endpoint temperature of cooked meat after storage by Raman spectroscopy and chemometrics. Food Control. 2015;52:119–125. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.12.011

44. Nache M, Hinrichs J, Scheier R, Schmidt H, Hitzmann B. Prediction of the pH as indicator of porcine meat quality using Raman spectroscopy and metaheuristics. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2016;154:45–51. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.03.011

45. Andersen PV, Afseth NK, Gjerlaug-Enger E, Wold JP. Prediction of water holding capacity and pH in porcine *longissimus lumborum* using Raman spectroscopy. Meat Science. 2021;172:108357. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108357

46. Bauer A, Scheier R, Eberle T, Schmidt H. 46 Meat Science. 2016;115:27–33. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.12.020

47. Nunes KM, Andrade MVO, Almeida MR, Fantini C, Sena MM. Raman spectroscopy and discriminant analysis applied to the detection of frauds in bovine meat by the addition of salts and carrageenan. Microchemical Journal. 2019;147:582–589. https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.03.076

48. Chen Q, Zhang Y, Guo Y, Cheng Y, Qian H, *et al*. Non-destructive prediction of texture of frozen/thaw raw beef by Raman spectroscopy. Journal of Food Engineering. 2020;266:109693. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109693

49. Zhao M, Nian Y, Allen P, Downey G, Kerry JP, *et al*. Application of Raman spectroscopy and chemometric techniques to assess sensory characteristics of young dairy bull beef. Food Research International. 2018;107:27–40. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.007

50. Logan BG, Hopkins DL, Schmidtke L, Morris S, Fowler SM. Preliminary investigation into the use of Raman spectroscopy for the verification of Australian grass and grain fed beef. Meat Science. 2020;160:107970. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107970

51. Nian Y, Zhao M, O'Donnell CP, Downey G, Kerry JP, *et al*. Assessment of physico-chemical traits related to eating quality of young dairy bull beef at different ageing times using Raman spectroscopy and chemometrics. Food Research International. 2017;99(Part 1):778–789. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.056

52. Fowler SM, Schmidt H, van de Ven R, Hopkins DL. Preliminary investigation of the use of Raman spectroscopy to predict meat and eating quality traits of beef loins. Meat Science. 2018;138:53–58. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.01.002

53. Robert C, Fraser-Miller SJ, Jessep WT, Bain WE, Hicks TM, *et al*. Rapid discrimination of intact beef, venison and lamb meat using Raman spectroscopy. Food Chemistry. 2021;343:128441. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128441

54. Fowler SM, Ponnampalam EN, Schmidt H, Wynn P, Hopkins DL. Prediction of intramuscular fat content and major fatty acid groups of lamb *M. longissimus lumborum* using Raman spectroscopy. Meat Science. 2015;110:70–75. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.06.016

55. Schmidt H, Scheier R, Hopkins DL. Preliminary investigation on the relationship of Raman spectra of sheep meat with shear force and cooking loss. Meat Science. 2013;93(1):138–143. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.08.019

56. Fowler SM, Schmidt H, van de Ven R, Wynn P, Hopkins DL. Raman spectroscopy compared against traditional predictors of shear force in lamb *m. longissimus lumborum*. Meat Science. 2014;98(4):652–656. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.042

57. Fowler SM, Schmidt H, van de Ven R, Wynn P, Hopkins DL. Predicting tenderness of fresh ovine *semimembranosus* using Raman spectroscopy. Meat Science. 2014;97(4):597–601. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.02.018

58. Fowler SM, Schmidt H, van de Ven R, Wynn P, Hopkins DL. Predicting meat quality traits of ovine *m. semimembranosus*, both fresh and following freezing and thawing, using a hand held Raman spectroscopic device. Meat Science. 2015;108:138–144. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.06.010

59. Szykuła KM, Offermans T, Lischtschenko O, Meurs J, Guenther D, *et al*. Predicting animal welfare labels from pork fat using raman spectroscopy and chemometrics. AppliedChem. 2023;3(2):279–289. https://doi.org/10.3390/appliedchem3020017

60. Saleem M, Amin A, Irfan M. Raman spectroscopy based characterization of cow, goat and buffalo fats. Journal of Food Science and Technology. 2021;58(1):234–243. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04535-x

61. Berhe DT, Eskildsen CE, Lametsch R, Hviid MS, van den Berg F, *et al*. Prediction of total fatty acid parameters and individual fatty acids in pork backfat using Raman spectroscopy and chemometrics: Understanding the *cage of covariance* between highly correlated fat parameters. Meat Science. 2016;111:18–26. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.08.009

62. Logan BG, Hopkins DL, Schmidtke L, Morris S, Fowler SM. Preliminary investigation into the use of Raman spectroscopy for the verification of Australian grass and grain fed beef. Meat Science. 2020;160:107970. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107970

63. Ostovar pour S, Fowler SM, Hopkins DL, Torley PJ, Gil H, *et al*. Investigation of chemical composition of meat using spatially off-set Raman spectroscopy. Analyst. 2019;144(8):2618–2627. https://doi.org/10.1039/c8an01958d

64. Abbas O, Fernández Pierna JA, Codony R, von Holst C, Baeten V. Assessment of the discrimination of animal fat by FT-Raman spectroscopy. Journal of Molecular Structure. 2009;924–926:294–300. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.01.027

65. Boyaci IH, Uysal RS, Temiz T, Shendi EG, Yadegari RJ, *et al*. A rapid method for determination of the origin of meat and meat products based on the extracted fat spectra by using of Raman spectroscopy and chemometric method. European Food Research and Technology. 2014;238:845–852. https://doi.org/10.1007/s00217-014-2168-1

66. Lyndgaard LB, Sørensen KM, van der Berg F, Engelsen SB. Depth profiling of porcine adipose tissue by Raman spectroscopy. Journal of Raman Spectroscopy. 2012;43(4):482–489. https://doi.org/10.1002/jrs.3067

67. Gao F, Ben-Amotz D, Zhou S, Yang Z, Han L, *et al*. Comparison and chemical structure-related basis of species discrimination of animal fats by Raman spectroscopy using near-infrared and visible excitation lasers. LWT. 2020;134:110105. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110105

68. Li H, Haruna SA, Wang Y, Hassan M, Geng W, *et al*. Simultaneous quantification of deoxymyoglobin and oxymyoglobin in pork by Raman spectroscopy coupled with multivariate calibration. Food Chemistry. 2022;372:131146. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131146

69. Zhao M, Nian Y, Allen P, Downey G, Kerry JP, *et al*. Application of Raman spectroscopy and chemometric techniques to assess sensory characteristics of young dairy bull beef. Food Research International. 2018;107:27–40. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.007

70. Andersen PV, Afseth NK, Gjerlaug-Enger E, Wold JP. Prediction of water holding capacity and pH in porcine *longissimus lumborum* using Raman spectroscopy. Meat Science. 2020;172:108357. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108357

71. Reiner J, Protte K, Hinrichs J. Investigation of the applicability of raman spectroscopy as online process control during consumer milk production. ChemEngineering. 2020;4(3):45. https://doi.org/10.3390/chemengineering4030045

72. Acar-Soykut E, Tayyarcan EK, Boyaci IH. A simple and fast method for discrimination of phage and antibiotic contaminants in raw milk by using Raman spectroscopy. Journal of Food Science and Technology. 2018;55(1):82–89. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2798-y

73. Rodrigues Júnior PH, de Sá Oliveira K, de Almeida CE, de Oliveira LF, Stephani R, *et al*. FT-Raman and chemometric tools for rapid determination of quality parameters in milk powder: Classification of samples for the presence of lactose and fraud detection by addition of maltodextrin. Food Chemistry. 2016;196:584–588. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.055

74. Taylan O, Cebi N, Yilmaz MT, Sagdic O, Bakhsh AA. Detection of lard in butter using Raman spectroscopy combined with chemometrics. Food Chemistry. 2020;332:127344. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127344

75. Lohumi S, Lee H, Kim MS, Qin J, Cho B-K. Through-packaging analysis of butter adulteration using line-scan spatially offset Raman spectroscopy. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2018;410(22):5663–5673. https://doi.org/10.1007/s00216-018-1189-1

76. Gómez-Mascaraque LG, Kilcawley K, Hennessy D, Tobin JT, O'Callaghan TF. Raman spectroscopy: A rapid method to assess the effects of pasture feeding on the nutritional quality of butter. Journal of Dairy Science. 2020;103(10):8721–8731. https://doi.org/10.3168/jds.2020-18716

77. Genis DO, Sezer B, Durna S, Boyaci IH. Determination of milk fat authenticity in ultra-filtered white cheese by using Raman spectroscopy with multivariate data analysis. Food Chemistry. 2021;336:127699. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127699

78. Czaja T, Baranowska M, Mazurek S, Szostak R. Determination of nutritional parameters of yoghurts by FT Raman spectroscopy. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2018;196:413–417. https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.02.054

79. Karacaglar NNY, Bulat T, Boyaci IH, Topcu A. Raman spectroscopy coupled with chemometric methods for the discrimination of foreign fats and oils in cream and yogurt. Journal of Food and Drug Analysis. 2019;27(1):101–110. https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.06.008

80. Cheng Y, Dong Y, Wu J, Yang X, Bai H, *et al*. Screening melamine adulterant in milk powder with laser Raman spectrometry. Journal of Food Composition and Analysis. 2010;23(2):199–202. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.08.006

81. Karunathilaka SR, Farris S, Mossoba MM, Moore JC, Yakes BJ. Non-targeted detection of milk powder adulteration using Raman spectroscopy and chemometrics: Melamine case study. Food Additives & Contaminants: Part A. 2017;34(2):170–182. https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1260168

82. Yaman H. A rapid method for detection adulteration in goat milk by using vibrational spectroscopy in combination with chemometric methods. Journal of Food Science and Technology. 2020;57(8):3091–3098. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04342-4

83. He L, Chen T, Labuza TP. Recovery and quantitative detection of thiabendazole on apples using a surface swab capture method followed by surface-enhanced Raman spectroscopy. Food Chemistry. 2014;148:42–46. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.023

84. Sebben JA, da Silveira Espindola J, Ranzan L, de Moura NF, Trierweiler LF, *et al*. Development of a quantitative approach using Raman spectroscopy for carotenoids determination in processed sweet potato. Food Chemistry. 2018;245:1224–1231. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.086

85. Hara R, Ishigaki M, Kitahama Y, Ozaki Y, Genkawa T. Excitation wavelength selection for quantitative analysis of carotenoids in tomatoes using Raman spectroscopy. Food Chemistry. 2018;258:308–313. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.089

86. Hara R, Ishigaki M, Ozaki Y, Ahamed T, Noguchi R, *et al*. Effect of Raman exposure time on the quantitative and discriminant analyses of carotenoid concentrations in intact tomatoes. Food Chemistry. 2021;360:129896. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129896

87. Mandrile L, Rotunno S, Miozzi L, Vaira AM, Giovannozzi AM, *et al*. Nondestructive Raman spectroscopy as a tool for early detection and discrimination of the infection of tomato plants by two economically important viruses. Analytical Chemistry. 2019;91(14):9025–9031. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b01323

88. Khodabakhshian R. Feasibility of using Raman spectroscopy for detection of tannin changes in pomegranate fruits during maturity. Scientia Horticulturae. 2019;257:108670. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108670

89. Sanchez L, Pant S, Xing Z, Mandadi K, Kurouski D. Rapid and noninvasive diagnostics of Huanglongbing and nutrient deficits on citrus trees with a handheld Raman spectrometer. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2019;411:3125–3133. https://doi.org/10.1007/s00216-019-01776-4

90. César J-S, Ruiz JR. Use of Raman spectroscopy for analyzing edible vegetable oils. Applied Spectroscopy Reviews. 2016;51(5):417–430. https://doi.org/10.1080/05704928.2016.1141292

91. Covaciu F-D, Berghian-Grosan C, Feher I, Magdas DA. Edible oils differentiation based on the determination of fatty acids profile and Raman spectroscopy–A case study. Applied Sciences. 2020;10(23):8347. https://doi.org/10.3390/app10238347

92. Wang H, Xin Y, Ma H, Fang P, Li C, *et al*. Rapid detection of Chinese-specific peony seed oil by using confocal Raman spectroscopy and chemometrics. Food Chemistry. 2021;362:130041. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130041

93. Castro RC, Ribeiro DSM, Santos JLM, Páscoa RNMJ. The use of *in-situ* Raman spectroscopy to monitor at real time the quality of different types of edible oils under frying conditions. Food Control. 2022;136:108879. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108879

94. Zhao H, Zhan Y, Xu Z, Nduwamungu JJ, Zhou Y, *et al*. The application of machine-learning and Raman spectroscopy for the rapid detection of edible oils type and adulteration. Food Chemistry. 2022;373(Part B):131471. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131471

95. Samyn P, van Nieuwkerke D, Schoukens G, Vonck L, Stanssens D, *et al*. Quality and statistical classification of Brazilian vegetable oils using mid-infrared and Raman spectroscopy. Applied Spectroscopy. 2012;66(5):552–565. https://doi.org/10.1366/11-06484

96. Zou M-Q, Zhang X-F, Qi X-H, Ma H-L, Dong Y, *et al*. Rapid authentication of olive oil adulteration by Raman spectrometry. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2009;57(14):6001–6006. https://doi.org/10.1021/jf900217s

97. Tiryaki GY, Ayvaz H. Quantification of soybean oil adulteration in extra virgin olive oil using portable Raman spectroscopy. Journal of Food Measurement and Characterization. 2016;11(2):523–529. https://doi.org/10.1007/s11694-016-9419-8

98. Georgouli K, del Rincon JM, Koidis A. Continuous statistical modelling for rapid detection of adulteration of extra virgin olive oil using mid infrared and Raman spectroscopic data. Food Chemistry. 2017;217:735–742. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.011

99. Barros HASI, Santos LP, Filgueiras PR, Romão W. Design experiments to detect and quantify soybean oil in extra virgin olive oil using portable Raman spectroscopy. Vibrational Spectroscopy. 2021;116:103294. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2021.103294

100. Sánchez-López E, Sánchez-Rodríguez MI, Marinas A, Marinas JM, Urbano FJ, *et al*. Chemometric study of Andalusian extra virgin olive oils Raman spectra: Qualitative and quantitative information. Talanta. 2016;156–157:180–190. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.05.014

101. Berghian-Grosan C, Magdas DA. Raman spectroscopy and machine-learning for edible oils evaluation. Talanta. 2020;218:121176. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121176

102. Jiang H, He Y, Xu W, Chen Q. Quantitative detection of acid value during edible oil storage by Raman spectroscopy: Comparison of the optimization effects of BOSS and VCPA algorithms on the characteristic Raman spectra of edible oils. Food Analytical Methods. 2021;14:1826–1835. https://doi.org/10.1007/s12161-020-01939-5

103. Fang P, Wang H, Wan X. Olive oil authentication based on quantitative *β*-carotene Raman spectra detection. Food Chemistry. 2022;397:133763. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133763

104. Zhao H, Zhan Y, Xu Z, Nduwamungu J, Zhou Y, *et al*. The application of machine-learning and Raman spectroscopy for the rapid detection of edible oils type and adulteration. Food Chemistry. 2022;373(Part B):131471. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131471

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Лисицын Андрей Борисович / Andrey B. Lisitsyn ORCID 0000-0002-4079-6950; eLIBRARY SPIN 9423-1852
Чернуха Ирина Михайловна / Irina M. Chernukha ORCID 0000-0003-4298-0927; eLIBRARY SPIN 3423-3754
Никитина Марина Александровна / Marina A. Nikitina ORCID 0000-0002-8313-4105; eLIBRARY SPIN 3179-0920
Пчелкина Виктория Александровна / Viktoriya A. Pchelkina ORCID 0000-0001-8923-8661; eLIBRARY SPIN 9943-8980

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2603
https://elibrary.ru/VBRMPW

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

Diet Therapy Fortified with Plant-Based Specialized Products to Prevent Cardiovascular Risk

Elena S. Simonenko[1,*], Sergey V. Simonenko[1], Tatiana S. Zaletova[2], Anatoly A. Khitrov[3], Elena S. Semenova[1], Anna V. Begunova[1], Irina S. Samsonova[1]

[1] *Scientific Research Institute of Baby Food – a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety", Istra, Russia*

[2] *Federal Research Center of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia*

[3] *Biomedical Innovation Technologies Ltd, Mednoye, Russia*

Received: 17.06.2025
Revised: 13.08.2025
Accepted: 02.09.2025

**e-mail: nir@niidp.ru*
© E.S. Simonenko, S.V. Simonenko, T.S. Zaletova, A.A. Khitrov, E.S. Semenova, A.V. Begunova, I.S. Samsonova, 2025

Abstract.
Cardiovascular disease remains the leading cause of death worldwide, largely due to unhealthy diet, obesity, and associated metabolic disorders. Formulating specialized food products incorporating milk fat replacers could help reduce these risks. Forty patients from the personalized diet therapy department were recruited for the study and randomized into two groups. The study group (n = 20) received a low-calorie diet fortified with a specialized preventative product, while the control group (n = 20) received an unfortified diet. The diagnostic tests included a clinical examination (medical history, physical examination, and anthropometric measurements such as body mass index, blood pressure, and heart rate), laboratory tests (clinical and biochemical blood tests, analyses of the lipid profile, carbohydrate metabolism, vitamin status, and antioxidant activity), instrumental methods (bioimpedance analysis, indirect calorimetry), as well as diet analysis, protein metabolism analysis, sensory evaluation, and monitoring of side effects. Statistical analysis was performed in StatTech v.3.0.4.
Fortifying the diet with the specialized product resulted in a significant reduction in total cholesterol (by 13.5%), low-density lipoprotein cholesterol (by 12.1%), and fat mass (by 1.5%) with preserved muscle tissue. Significant improvements in metabolic parameters included a 13.0% decrease in homocysteine levels, lower oxidative stress (malonaldehyde down by 31.9%), and a 58.3% increase in vitamin B_{12}. The administration of this diet therapy was not associated with the development of any adverse reactions.
The specialized preventative product manufactured using cheese technology can be recommended for use in preventative nutrition to reduce cardiovascular risks.

Keywords. Milk fat replacers, dyslipidemia, bioimpedance analysis, cardioprotection, antiatherogenic

Funding. This research was funded as part of State Assignment FGMF-2025-0007 "Development of the composition, recipes, technologies of baby and gerodietetic food products to optimize the diets of children of different age groups and the elderly, as well as the development of methods for the prevention and correction of nutritional status disorders in children and adolescents using innovative baby food products".

For citation: Simonenko ES, Simonenko SV, Zaletova TS, Khitrov AA, Semenova ES, *et al.* Diet Therapy Fortified with Plant-Based Specialized Products to Prevent Cardiovascular Risk. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4): 744–754. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2603

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2603
https://elibrary.ru/VBRMPW

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Инновационные подходы к созданию специализированных продуктов на основе растительного сырья как ключ к профилактике кардиоваскулярных рисков

Е. С. Симоненко[1,*], С. В. Симоненко[1], Т. С. Залетова[2], А. А. Хитров[3], Е. С. Семенова[1], А. В. Бегунова[1], И. С. Самсонова[1]

[1] *Научно-исследовательский институт детского питания – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», Истра, Россия*

[2] *Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия*

[3] *ООО Научное производственное объединение «Биомедицинские инновационные технологии», Медное, Россия*

Поступила в редакцию: 17.06.2025
Принята после рецензирования: 13.08.2025
Принята к публикации: 02.09.2025

**e-mail: nir@niidp.ru*

© Е. С. Симоненко, С. В. Симоненко, Т. С. Залетова, А. А. Хитров, Е. С. Семенова, А. В. Бегунова, И. С. Самсонова, 2025

Аннотация.
Сердечно-сосудистые заболевания остаются ведущей причиной смерти в мире, во многом из-за распространенности нездорового питания, ожирения и сопутствующих метаболических нарушений. Разработка специализированных пищевых продуктов, включающих заменители молочного жира, может способствовать снижению этих рисков.
В исследование включили 40 пациентов отделения персонализированной диетотерапии, рандомизированных на две сопоставимые группы: основная (ОГ, n = 20) получала специализированный продукт для диетического профилактического питания в дополнение к низкокалорийной диете, контрольная (КГ, n = 20) – только диету. Диагностический комплекс включал клиническое обследование (анамнез, осмотр, антропометрию с ИМТ, АД, ЧСС), лабораторные анализы (клинический и биохимический анализы крови с оценкой липидного профиля, углеводного обмена, витаминного статуса и антиоксидантной активности), инструментальные методы (биоимпедансометрию, непрямую калориметрию), анализ рациона, исследование белкового обмена, органолептическую оценку и мониторинг побочных эффектов. Статистический анализ выполняли в StatTech v.3.0.4.
Исследование показало, что включение специализированного продукта в диету обеспечило значимое снижение общего холестерина на 13,5 % и холестерина ЛПНП на 12,1 %, а также уменьшение жировой массы на 1,5 % при сохранении мышечной ткани. Отмечено существенное улучшение метаболических показателей: снижение уровня гомоцистеина на 13,0 %, уменьшение окислительного стресса (малоновый альдегид снизился на 31,9 %) и повышение уровня витамина B_{12} на 58,3 %. Применение данной диетотерапии не сопровождалось развитием побочных реакций.
Специализированный для диетического профилактического питания продукт, изготовленный по технологии сыра, может быть рекомендован для использования в диетическом профилактическом питании путем включения в состав рациона для снижения кардиоваскулярных рисков.

Ключевые слова. Заменители молочного жира, дислипидемия, биоимпедансометрия, кардиопротекция, антиатерогенный

Финансирование. Работа по подготовке рукописи проведена за счет средств субсидии на выполнение государственного задания по направлению FGMF-2025-0007 «Разработка состава, рецептур, технологий продуктов детского и геродиетического питания для оптимизации пищевых рационов детей различных возрастных групп и лиц пожилого возраста, а также разработка способов профилактики и коррекции нарушений пищевого статуса у детей и подростков с применением инновационных продуктов детского питания».

Для цитирования: Симоненко Е. С., Симоненко С. В., Залетова Т. С., Хитров А. А., Семенова Е. С. и др. Инновационные подходы к созданию специализированных продуктов на основе растительного сырья как ключ к профилактике кардиоваскулярных рисков. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 744–754. (На англ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2603

Introduction

Cardiovascular diseases (CVDs) are the leading cause of death both in Russia and worldwide. According to the World Health Organization (WHO), they account for about one-third of all deaths, with a significant proportion of premature deaths among people under 70 years of age [1, 2]. Cardiovascular diseases include ischemic heart disease, cerebrovascular disease, peripheral arterial

disease, rheumatic heart disease, congenital defects, deep vein thrombosis, and pulmonary embolism. Myocardial infarction and stroke are among the most common and dangerous complications of CVDs. They are caused by atherosclerotic changes in the vascular wall, namely fatty and cholesterol plaques that narrow the lumen of the artery [3, 4].

The main risk factors for CVDs are behavioral in nature and include an unhealthy diet, low physical activity, smoking, alcohol abuse, as well as overweight and obesity. Other contributing factors are hypercholesterolemia, hypertension, and diabetes mellitus [5]. High cholesterol is a common condition in Russia. According to the All-Russian Epidemiological Study of Cardiovascular Diseases and their Risk Factors (ESSE-RF), 8.1% of men and 57.9% of women have high cholesterol levels, with their average values approaching the threshold for the norm. Obesity, especially abdominal obesity, has also reached epidemic proportions afflicting 30% of the adult population according to the ESSE-RF. Diabetes mellitus, especially type 2, is an independent risk factor for CVDs that significantly increases the risk of developing atherosclerosis. According to various sources, the incidence of diabetes in Russia ranges from 3.1 to 8.2%, with almost 90% of all cases being type 2 diabetes [6–8]. Its dietary risk factors include excessive consumption of salt, saturated and trans fats, as well as inadequate consumption of fiber, vegetables, and fruits. On average, Russians consume more than 11 g salt per day, while the WHO recommends limiting its consumption to 5 g. Lower sodium intake has been shown to reduce blood pressure and the risk of stroke [9]. Trans fats are the most atherogenic components of the diet. Their increase by only 2% leads to a 23% increase in the risk of coronary heart disease [10, 11].

Although the risk factors for CVDs have long been known, large-scale studies such as the REACH registry and EUROASPIRE demonstrate their high prevalence and inadequate control. This highlights the clinical importance of their prevention, monitoring, and correction [12]. The cornerstone of prevention is a healthy diet, with abstinence from smoking and alcohol, as well as increased physical activity and controlled body weight, blood pressure, cholesterol, and blood sugar levels [3]. This calls for creating specialized food products with proven therapeutic and preventative efficacy to restore reduced or lost bodily functions and enhance the body's adaptive capacity. These products should contain ingredients that can correct metabolic and antioxidant status disorders from an evidence-based medicine perspective [13].

Diet therapy is one of the main non-drug methods for preventing and treating CVDs. Modern dietary approaches aim not only to reduce caloric intake but also to optimize the diet by incorporating macro- and micronutrients, as well as specialized products fortified with vitamins and antioxidants [14, 15].

Another risk factor for cardiovascular health is dyslipidemia, which is characterized by elevated levels of low-density lipoproteins [16]. Numerous studies demonstrate that excessive consumption of saturated fatty acids leads to a significant increase in LDL cholesterol levels in the blood plasma. Doctors are particularly concerned about traditional dairy products that are high in saturated fats. These products are associated with an increased risk of atherosclerosis, a pathological change in large arteries that underlies most cardiovascular pathologies [17, 18].

Modern approaches to addressing dyslipidemia include the development of low-fat products [19]. However, fats affect the sensory properties of food, so their complete elimination can reduce its consumer appeal [20]. Therefore, fat substitutes are used to preserve the taste and texture of foods while reducing their caloric content [21].

Clinical guidelines from the American Heart Association and the European Society of Cardiology emphasize the importance of non-pharmacological approaches to reducing cardiovascular risk, including the modification of the fat composition of food. For the primary prevention of CVDs, they recommend using vegetable oils to replace saturated fatty acids with mono- and polyunsaturated fatty acids. Furthermore, the guidelines highlight the benefits of a plant-based diet, which is associated with lower mortality compared to a diet based on animal products [22, 23].

Therefore, modern strategies for preventing cardiovascular disease should be comprehensive and involve limiting saturated fatty acids in foods while preserving their sensory and nutritional properties; replacing saturated fatty acids with biologically complete alternatives while monitoring their lipid profile and the origin of their fat components; and personalizing diet therapy based on the patient's metabolic status. These approaches can simultaneously improve the lipid profile and nutritional appeal of diet foods, as well as ensure better weight control.

Milk fat replacers are products designed to replace, partially or completely, natural milk fat in foods. Their use benefits both consumers and food manufacturers. In particular, milk fat replacers:

– promote cardiovascular health by reducing low-density lipoproteins, aid weight management due to reduced caloric content [24, 25], and make dairy products more available in the regions where natural milk fat production is limited for climatic or economic reasons [26];
– are a cost-effective ingredient (compared to natural milk fat) that can be used to create products with a longer shelf life and therefore lower product loss and higher market availability [27]; and
– have certain technological properties that can improve the texture, structure, and stability of various food products such as ice cream, cream, cheese, and baked goods [28].

In this study, we aimed to evaluate the effectiveness of a diet fortified with a specialized preventative product manufactured according to the cheese technology in comparison with an unfortified diet in adults.

Study objects and methods

Forty patients from the Personalized Diet Therapy Department were recruited for the study according to the inclusion and exclusion criteria (see below). The study was approved by the local ethics committee of the Federal Research Center of Nutrition and Biotechnology (Protocol No. 3, March 15, 2023).

Inclusion criteria:

– age of 18 to 60 years old;
– a signed informed consent;
– obesity (BMI over 3 kg/m^2);
– arterial hypertension for at least 5 years (including drug-controlled hypertension); and
– lipoprotein metabolism disorders: pure hypercholesterolemia, mixed hyperlipidemia (including drug-controlled disorders) for at least 5 years.

Exclusion criteria:

– pregnancy and/or breastfeeding;
– patient's reluctance;
– intolerance to ingredients in the study product;
– history of food allergies;
– acute myocardial infarction, acute cerebrovascular disorder, major surgery, or injury sustained over the last 6 months;
– cancer; and
– gastrointestinal pathology requiring medical correction.

The patients were randomized into two groups: a study group of 20 patients and a control of 20 patients. The groups were matched and controlled for age, gender, symptoms, disease duration, and medication use. No statistically significant differences were found between the groups for any of these parameters.

The control group received a low-calorie standard diet for two weeks, with moderate energy restriction (up to 1300–1600 kcal/day) mainly at the expense of fats and carbohydrates. Simple sugars were excluded, animal fats were reduced, and table salt was limited to 3–5 g/day.

The study group had a modified diet therapy for two weeks, which was a low-calorie standard diet fortified with a specialized preventative product (100 g) made according to the cheese technology.

The specialized preventative diet product was manufactured according to the technological guidelines and food production requirements established by the Technical Regulations of the Customs Union.

The nutritional and energy value of 100 g of the product is provided in Table 1.

The average daily nutrient content and energy value of the diets are presented in Table 2.

The diets had limited amounts of table salt (5 g/day), as well as chemical and mechanical irritants to the stomach and bile ducts. The meals were boiled, stewed, baked, pureed, or steamed. The food temperature ranged from 15 to 60–65°C. Free liquid intake was 1.5–2.0 liters. The patients had six meals a day.

Table 1. Nutritional value of the specialized product (per 100 g)

Таблица 1. Пищевая ценность специализированного продукта (содержание в 100 г продукта)

Component	Value
Fat, g	25.0
Protein, g	14.0
Carbohydrates, g	5.0
Vitamin E (tocopherol), mg	15.0
Vitamin B_{12} (cyanocobalamin), mcg	3.0
Energy value, kcal/kJ	301.0/1260.0

Table 2. Average daily nutrient content and energy value of the diets

Таблица 2. Среднесуточное содержание пищевых веществ и энергетическая ценность диет

Type of diet	Protein, g	Fat, g	Carbohydrates, g	Energy value, kcal
Low-calorie diet	70–80	60–70	130–150	1340–1550
Modified diet	84–94	85–95	135–155	1640–1850

Medication therapy was administered according to the standard regimens for medical conditions and was not adjusted during the study.

General clinical methods. Clinical and functional research methods included collecting complaints, taking a medical history, and performing a physical examination.

All the patients had their height and weight measured, with their BMI calculated using the Quetelet's index (kg/m^2) = weight/height.

They had their blood pressure measured with a mechanical tonometer, as well as their heart rate.

Biochemical analyses were performed using an AU 680 automated analyzer (Beckman Coulter, USA). Serum venous blood was analyzed for total cholesterol, high-density lipoprotein cholesterol, low-density lipoprotein cholesterol, triglycerides, glucose, creatinine with a calculated glomerular filtration rate, urea, uric acid, total bilirubin, alanine aminotransferase, aspartate aminotransferase, and potassium.

Complete blood panel parameters were assessed using an LH 750 analyzer (Beckman Coulter, USA). They included red blood cell and white blood cell counts, hemoglobin, platelet, and an erythrocyte sedimentation rate.

Insulin levels were measured using an Immulite Xp 2000i automated analyzer (Siemens Healthcare Diagnostics, Germany).

The vitamin status (vitamins E, B_{12}, homocysteine) was assessed using an AU 680 automated analyzer (Beckman Coulter, USA).

The antioxidant defense indicators (plasma antioxidant activity, superoxide dismutase, malondialdehyde) were determined using an ELISA reader (Tecan, USA).

The nutritional intake (dietary energy, macro- and micronutrients) was assessed by frequency analysis using the Nutrilogic service (Nutrilogic, Russia, state registration certificate No. 2018614588 dated February 19, 2018).

Body composition measurements were analyzed by bioimpedance analysis using the LookinBody software and the InBody 720 analyzer (Biospace, South Korea). They included fat mass, lean mass, skeletal muscle mass, and total body water. For the measurements, the patients had to be in the fasting state, stand barefoot on a scale, and hold the analyzer handles with both hands.

Basal metabolic expenditure was measured by indirect calorimetry using a Quark RMR stationary metabolograph (COSMED, Italy) with a dome. The respiratory quotient was calculated from noninvasive measurements of oxygen consumption and carbon dioxide production, as well as ventilation parameters.

Daily protein losses were calculated based on the concentration of urea in a 24-hour urine sample using the formula:

$$POR = (U \times 0.446 + 4) \times 6.25$$

where POR is the protein oxidation rate, g/day; U is the urea, g/day. The resulting residual nitrogen value was used to further calculate daily protein losses. The fat oxidation rate and the carbohydrate oxidation rate were also determined by using the software (COSMED, Italy).

The course of treatment was recorded in the patients' medical records. The measured parameter values were entered in the individual patient registration cards according to the research protocol.

The dishes were evaluated on a 5-point scale for their sensory properties such as taste, smell, color, consistency, and appearance.

Statistical research methods. Quantitative variables were assessed for normal distribution using the Shapiro-Wilk test (for fewer than 50 subjects) or the Kolmogorov-Smirnov test (for more than 50 subjects).

Normally distributed quantitative variables were described using mean values (M) and standard deviations (SD), along with 95% confidence intervals (95% CI).

If not normally distributed, quantitative data were described using the median (Me) and lower and upper quartiles (Q1–Q3).

Categorical data were described in absolute values and percentages.

The Student's *t*-test was performed to compare two groups for a normally distributed quantitative variable, assuming equal variances.

The Mann-Whitney *U*-test was performed to compare two groups for a non-normally distributed quantitative variable. The paired Student's *t*-test was performed to compare normally distributed quantitative variables in two related samples.

The Wilcoxon *t*-test was performed to compare non-normally distributed quantitative variables in two related groups. The software StatTech v. 3.0.4 (StatTech, Russia) was used for statistical analysis.

Results and discussion

Nutritional value of the actual diet. The most common indicators of dysnutrition in the patients were: excessive intake of total fat (+82.5%), saturated fatty acids (+91.1%), and cholesterol (+110.4%), as well as a deficiency of dietary fiber (–33.5%), omega-3 PUFAs (–21.0%), potassium (–19.6%), magnesium (–22.2%), phosphorus (–15.5%), iron (–17.0%), and vitamins A (–12.4%), E (–33.7%), B_2 (–12.1%), and D (–60.7%).

Anthropometric parameters. Almost all the patients, regardless of the diet therapy administered, had statistically significant positive changes in their body weight and body mass index (BMI). The comparative analysis of their anthropometric parameters over time between the groups is presented in Table 3.

As can be seen, only the study group demonstrated a statistically significant reduction in fat mass. In contrast to the study group, the control group showed a statistically significant reduction in lean mass and skeletal muscle mass, suggesting a negative impact of the chosen diet therapy. It should be noted that the study group received a higher-calorie version of the standard diet and its patients had lower body weight. However, they demonstrated significantly better changes in fat and lean mass in addition to weight loss.

Resting energy expenditure. Resting energy expenditure values remained unchanged in both the study and the control groups (Table 4). However, the control group demonstrated a statistically significant increase in the carbohydrate oxidation rate, with a decrease in the fat oxidation rate. This might explain the less efficient loss of fat mass in this group. The protein oxidation rates did not change significantly in both groups.

The data revealed that the modified diet, along with the traditional diet therapy, did not decrease the activity of the body's energy processes or cause changes in the macronutrient oxidation rates.

Blood test parameters. Changes in blood glucose levels are presented in Fig. 1. Initially, the glucose levels did not differ statistically between the groups, with 6.4 (5.8–6.7) mmol/L in the control group and 6.0 (5.4–6.4) mmol/L in the study group. The treatment (diet therapy) caused no increase in this parameter, with no hypoglycemic therapy administered. Furthermore, there was a significant decrease within the reference range in the control group. Thus, the modified diet produced no effect on the patients' glycemic profile.

Changes in the lipid profile during the diet therapy are presented in Table 5.

Comparable statistically significant changes were observed in both groups during the treatment, namely a decrease in total cholesterol and low-density lipoprotein cholesterol. This indicated an anti-atherogenic effect of the modified diet, comparable to the standard diet therapy. A relatively negative effect of the diet therapy was a significant decrease in high-density lipoprotein cholesterol, from 1.5 ± 0.3 to 1.4 ± 0.3 mmol/L in the study group and from 1.1 ± 0.2 to 1.0 ± 0.2 mmol/L in the control group.

Blood vitamin analysis (Table 6) revealed an increase in vitamin B_{12} levels from 252 (228–325) to 399 (270–462) pg/mL in the study group, with no changes in the control group. Vitamin E levels decreased in the study group, while remaining unchanged in the control group.

Homocysteine levels decreased from 11.5 ± 1.2 to 10.0 ± 1.0 μmol/L ($p < 0.001$) in the study group and from 12.3 ± 0.9 to 10.6 ± 0.6 μmol/L ($p < 0.001$) in the control group (Fig. 2), demonstrating the anti-atherogenic effect of the modified diet.

Table 3. Body composition changes during diet therapy

Таблица 3. Анализ динамики показателей состава тела на фоне проводимой диетотерапии

Parameter	Stage	Control group	Study group
Body weight Me (Q_1–Q_3), kg	1	111.6 (89.3–117.6)	88.7 (78.2–92.8)
	2	106.0 (88.3–115.0)	86.8 (77.1–91.8)
	p	0.002*	< 0.001*
Body mass index M ± SD, kg/m^2	1	38.7 ± 7.7	33.5 ± 7.0
	2	38.1 ± 7.4	33.1 ± 6.8
	p	0.001*	< 0.001*
Fat mass M ± SD, kg	1	47.0 ± 15.9	39.7 ± 12.6
	2	46.6 ± 15.3	39.1 ± 12.2
	p	0.293	0.015*
Lean mass Me (Q_1–Q_3), kg	1	57.2 (52.9–64.5)	46.7 (41.2–48.2)
	2	56.3 (52.7–63.4)	45.4 (40.9–49.1)
	p	0.001*	0.078
Skeletal muscle mass Me (Q_1–Q_3), kg	1	33.6 (31.1–39.8)	27.1 (23.9–27.9)
	2	33.2 (31.0–38.1)	26.4 (23.7–28.6)
	p	0.004*	0.092
Total body water Me (Q_1–Q_3), kg	1	44.6 (41.2–49.9)	36.4 (32.0–37.7)
	2	44.2 (41.1–49.0)	35.3 (31.8–38.5)
	p	0.021*	0.078

Note: * – statistically significant differences ($p < 0.05$).

Примечание: * – различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$).

Table 4. Changes in resting energy expenditure during diet therapy

Таблица 4. Анализ динамики показателей энерготрат покоя на фоне проводимой диетотерапии

Parameter	Stage	Control group	Study group
Carbohydrate oxidation Me (Q_1–Q_3), g/day	1	21 (15–26)	75 (10–320)
	2	47 (41–73)	108 (16–289)
	p	< 0.001*	0.640
Fat oxidation Me (Q_1–Q_3), g/day	1	200 (186–234)	131 (35–154)
	2	182 (152–218)	132 (87–183)
	p	0.049*	0.284
Protein oxidation Me (Q_1–Q_3), g/day	1	77 (71–85)	58 (51–62)
	2	76 (70–86)	65 (50–73)
	p	0.670	0.212
Resting energy expenditure Me (Q_1–Q_3), kcal/day	1	2042 (1882–2260)	1564 (1384–1694)
	2	2037 (1859–2281)	1726 (1328–1950)
	p	0.670	0.495

Note: * – statistically significant differences ($p < 0.05$).

Примечание: * – различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$).

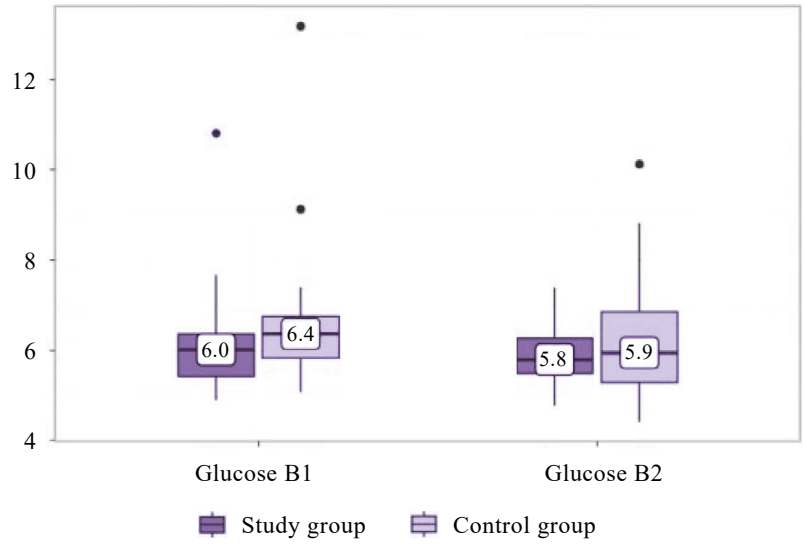


Figure 1. Changes in blood glucose levels during diet therapy

Рисунок1. Анализ динамики глюкозы крови на фоне проводимой диетотерапии

Table 5. Changes in lipid profile during diet therapy

Таблица 5. Анализ динамики липидного профиля на фоне проводимой диетотерапии

Parameter	Stage	Control group	Study group
Total cholesterol M ± SD, mmol/L	1	4.7 ± 1.2	5.2 ± 1.3
	2	3.9 ± 1.0	4.5 ± 1.2
	p	0.001*	0.019*
Triglycerides Me (Q_1–Q_3), mmol/L	1	1.5 (1.1–2.1)	0.9 (0.8–1.2)
	2	1.1 (0.9–1.3)	0.8 (0.6–1.1)
	p	0.005*	0.097
High-density lipoprotein cholesterol M ± SD, mmol/L	1	1.1 ± 0.2	1.5 ± 0.3
	2	1.0 ± 0.2	1.4 ± 0.3
	p	0.015*	0.016*
Low-density lipoprotein cholesterol M ± SD, mmol/L	1	3.1 ± 1.0	3.3 ± 1.0
	2	2.5 ± 0.8	2.9 ± 1.0
	p	< 0.001*	0.035*

Note: * – statistically significant differences ($p < 0.05$).

Примечание: * – различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$).

Table 6. Changes in vitamin levels during diet therapy

Таблица 6. Анализ динамики витаминов на фоне проводимой диетотерапии

Parameter	Stage	Control group	Study group
Vitamin E Me (Q_1–Q_3), mcg/mL	1	1.2 (1.1–1.4)	1.4 (1.2–1.6)
	2	1.2 (1.0–1.3)	1.2 (1.0–1.5)
	p	0.258	0.009*
Vitamin B_{12} Me (Q_1–Q_3), pg/mL	1	248 (127–320)	252 (228–325)
	2	265 (143–440)	399 (270–462)
	p	0.927	< 0.001*

Note: * – statistically significant differences ($p < 0.05$).

Примечание: * – различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$).

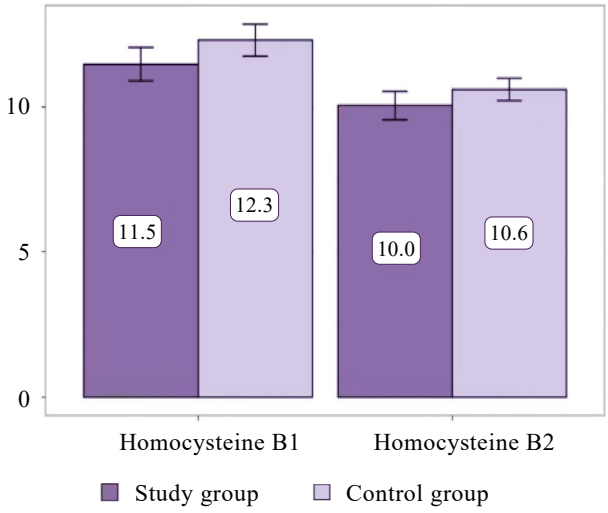


Figure 2. Changes in homocysteine levels during diet therapy

Рисунок 2. Анализ динамики гомоцистеина на фоне проводимой диетотерапии

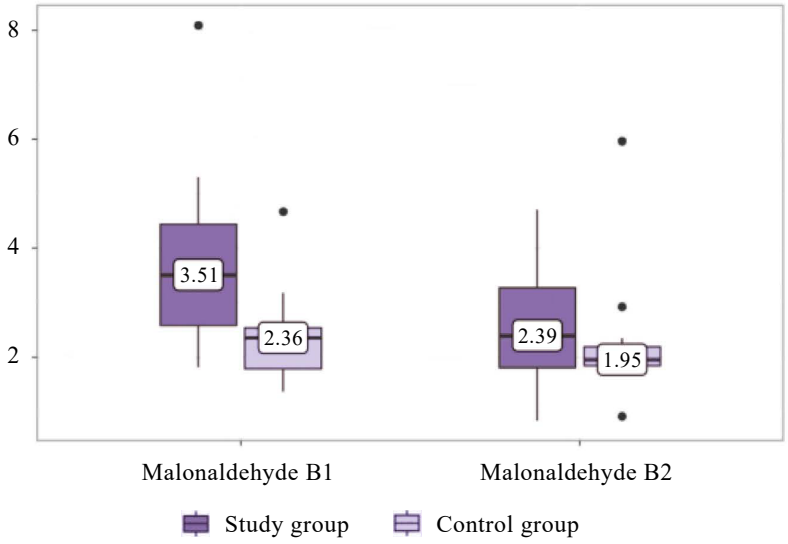


Figure 3. Changes in malonaldehyde levels during diet therapy

Рисунок 3. Анализ динамики малонового альдегида на фоне проводимой диетотерапии

Superoxide dismutase levels did not change significantly in either group during the diet therapy. In particular, they slightly increased from 184.62 ± 44.19 to 206.17 ± 49.08 (p = 0.079) in the study group and from 161.22 ± 66.02 to 169.40 ± 25.24 (p = 0.700) in the control group.

As can be seen from Fig. 3, the concentration of malonaldehyde significantly decreased from 3.51 (2.58–4.44) to 2.39 (1.80–3.27) in the study group (p = 0.002), but remained unchanged in the control group (p = 0.497). Our results indicated a decrease in the intensity of lipid peroxidation during the diet therapy.No changes in blood insulin levels were observed in either of the groups.

Other biochemical blood parameters showed similar trends in both groups and were characterized by moderate changes within the reference values (Table 7). A statistically significant decrease was observed in aspartate aminotransferase levels in the study group, namely from 22.5 (19.3–29.8) to 22.1 (18.2–26.4) U/L. Total bilirubin levels also significantly decreased, from 12.3 (10.0–15.7) to 10.0 (7.4–12.1) μmol/L in the study group and from 14.5 (11.1–18.5) to 12.9 (10.4–14.1) μmol/L in the control group. However, these values remained within the reference ranges.

Tolerability of the diet therapy. The modified diet showed good tolerability and safety, with no side effects or signs of intolerance observed during the study period in either the control or study groups (dyspepsia: regurgitation, nausea, heartburn, bitter taste in the mouth; stomach ache; allergic reactions).

Table 7. Changes in biochemical blood parameters during diet therapy

Таблица 7. Анализ динамики биохимических показателей крови на фоне проводимой диетотерапии

Parameter	Stage	Control group	Study group
Aspartate aminotransferase Me (Q_1–Q_3), U/L	1	22.2 (19.9–26.2)	22.5 (19.3–29.8)
	2	25.1 (22.7–29.5)	22.1 (18.2–26.4)
	p	0.060	0.036*
Alanine aminotransferase Me (Q_1–Q_3), U/L	1	24.7 (18.7–33.0)	19.9 (15.5–32.2)
	2	31.1 (21.3–35.5)	17.0 (14.2–25.0)
	p	0.580	0.165
Total bilirubin Me (Q_1–Q_3), μmol/L	1	14.5 (11.1–18.5)	12.3 (10.0–15.7)
	2	12.9 (10.4–14.1)	10.0 (7.4–12.1)
	p	0.048*	0.014*
Creatinine Me (Q_1–Q_3), μmol/L	1	86.3 (72.6–99.4)	80.2 (72.0–89.5)
	2	93.5 (74.9–102.6)	82.5 (77.5–87.5)
	p	0.368	0.143
Glomerular filtration rate M ± SD	1	74 ± 21	73 ± 16
	2	72 ± 19	70 ± 15
	p	0.280	0.188
Urea Me (Q_1–Q_3), mmol/L	1	5.1 (4.3–6.7)	5.7 (5.1–6.8)
	2	5.3 (4.8–7.5)	6.5 (5.5–6.8)
	p	0.464	0.097
Uric acid M ± SD, μmol/L	1	375.4 ± 109.7	313.3 ± 100.2
	2	393.9 ± 111.8	313.8 ± 86.1
	p	0.162	0.952
Potassium Me (Q_1–Q_3), mmol/L	1	4.3 (4.1–4.4)	4.4 (4.0–4.5)
	2	4.4 (4.0–4.7)	4.4 (4.2–4.6)
	p	0.246	0.064

Note: * – statistically significant differences ($p < 0.05$).

Примечание: * – различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$).

Table 8. Sensory evaluation of diet therapy

Таблица 8. Органолептическая оценка диетотерапии

Parameter	Control group	Study group
	Average scores on a 5-point scale	
Taste	4.25	4.85
Smell	4.15	4.80
Color	4.50	4.95
Consistency	4.35	4.85
Appearance	4.50	4.95

The sensory evaluation of the diet products included the following parameters: taste, smell, color, consistency, and appearance (Table 8). According to the results, the modified diet was evaluated positively, with scores averaging 24 out of 25 in the study group, compared to 22 out of 25 in the control group.

Conclusion

The modified diet (fortified with a specialized preventative product manufactured using cheese technology) demonstrated a number of clinically significant effects compared to the standard diet therapy. In particular, we found a statistically significant reduction in total cholesterol and low-density lipoprotein cholesterol levels, indicating the antiatherogenic effect of the diet therapy and a reduced risk of cardiovascular complications. We also observed a statistically significant decrease in homocysteine levels, a risk factor for vascular pathologies, including peripheral arterial disease, nephropathy, and retinopathy. Further, the modified diet helped replenish vitamin B_{12} deficiency and reduce malonaldehyde levels, lessening the intensity of lipid peroxidation. Among its other positive effects was the ability to maintain resting energy expenditure while reducing body weight. Despite its higher caloric content, the modified diet significantly reduced fat mass in obese patients while maintaining their lean mass. In addition, we observed a reduction in clinical symptoms among the patients. Finally, the specialized product received a good sensory evaluation and showed excellent tolerability.

Thus, our specialized preventative diet product can be incorporated into preventative dietary regimens to maintain cardiovascular health.

We plan to expand the range of specialized preventative products by formulating products with bioactive ingredients that have proven cardioprotective effects. Algae, for example, have great potential due to their complex of bioactive compounds with a pronounced positive effect on the cardiovascular system.

Algae components such as omega-3 polyunsaturated fatty acids, antioxidants, peptides, and polysaccharides help reduce the risk of cardiovascular disease by improving lipid profiles, lowering blood pressure, and reducing inflammation and oxidative stress. Algae are a rich source of omega-3 fatty acids, such as eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids. These acids have hypolipidemic and antihypertensive effects, improving the endothelial function and reducing the risk of arrhythmia. Studies have shown that these acids obtained from the microalgae *Schizochytrium* and *Crypthecodinium* can reduce plasma triglyceride levels and systolic blood pressure in both animals and humans. Algae also contain high levels of antioxidants, such as carotenoids (e.g., astaxanthin), polyphenols, and vitamin C. These compounds reduce oxidative stress, which plays a key role in the development of atherosclerosis and other cardiovascular diseases. Astaxanthin, in particular, has potent antiinflammatory and antioxidant properties, protecting endothelial cells from damage. Furthermore, bioactive peptides isolated from algae such as *Laminaria* and *Ascophyllum* can inhibit angiotensin-converting enzyme, lowering blood pressure. Algae polysaccharides, particularly sulfated ones, have a hypocholesterolemic effect, reducing low-density lipoprotein cholesterol and triglyceride levels and stimulating the excretion of bile acids [29–31]. Thus, considering the promising cardioprotective potential of the bioactive compounds derived from algae, our subsequent research will focus on the development of novel specialized formulations based on these constituents, aimed at comprehensive prevention of cardiovascular diseases.

Contribution

E.S. Simonenko consolidated the material and described the results and discussion; S.V. Simonenko supervised the research and wrote the conclusion; A.A. Khitrov and T.S. Zaletova revised the manuscript; E.S. Semenova and A.V. Begunova described the study objects and methods; I.S. Samsonova collected and consolidated the material, as well as wrote the introduction.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Критерии авторства

Е. С. Симоненко – обобщение материала, написание раздела статьи по результатам исследования; С. В. Симоненко – руководство проектом, написание заключения; А. А. Хитров, Т. С. Залетова – доработка рукописи; Е. С. Семенова, А. В. Бегунова – написание раздела статьи по методам исследования; И. С. Самсонова – сбор и обобщение материала, написание введения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

1. Enina EN, Vaisman DSh, Bogdanova TG. Dynamics in incidence of diseases of the circulatory system and coverage of adult population with regular health examination in the Russian Federation in 2019–2023. Social aspects of population health. 2024;70(6):1. (In Russ.) https://doi.org/10.21045/2071-5021-2024-70-6-1

2. Cardiovascular diseases (CVDs). World Health Organization. (In Russ.) [cited 2025 May 25]. Available from: https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)

3. Erimbetova ZB, Begzhanova GS. Key ways for prevention of cardiovascular diseases. Economy and society. 2020;(5–1):638–640. (In Russ.) https://elibrary.ru/PZDFUT

4. Glushhenko VA, Irklienko EK. Cardiovascular morbidity – One of the most vital problems of modern health care. Medicine and healthcare organization. 2019;4(1):56–63. (In Russ.) https://elibrary.ru/KNGYDV

5. Bichurin DR, Atmaikina OV, Cherepanova OA. Cardiovascular diseases. A regional aspect. International Research Journal. 2023;(8):116. (In Russ.) https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.103

6. Karamnova NS, Kapustina AV, Kutsenko VA, Shvabskaya OB, Balanova YuA, *et al*. Nutritional status and the risk of cardiovascular events. Results of a 6-year prospective follow-up of the ESSE-RF study cohort. Russian Journal of Cardiology. 2024;29(9):5999. (In Russ.) https://doi.org/10.15829/1560-4071-2024-5999

7. Boytsov SA, Pogosova NV, Ansheles AA, *et al*. Cardiovascular prevention 2022. Russian national guidelines. Russian Journal of Cardiology. 2023;28(5):5452. (In Russ.) https://doi.org/10.15829/1560-4071-2023-5452

8. Monisov FM, Rugol LV. Assessment of primary medical care for patients with obesity in the Russian Federation. Current problems of health care and medical statistics. 2024;(3):701–712. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2312-2935-2024-3-701-712

9. He FJ, Tan M, Ma Y, MacGregor GA. Salt reduction to prevent hypertension and cardiovascular disease: *JACC* state-of-the-art review. Journal of the American College of Cardiology. 2020;75(6):632–647. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2019.11.055

10. Karamnova NS, Kapustina AV, Kutsenko VA, Shvabskaia OB, Balanova YuA, *et al*. Dietary habits and all-cause mortality risk in the adult population. Results of a 6-year prospective follow-up of the ESSE-RF study cohort. Cardiovascular Therapy and Prevention. 2024;23(9):4113. (In Russ.) https://doi.org/10.15829/1728-8800-2024-4113

11. Mozaffarian D, Katan MB, Ascherio A, Stampfer MJ, Willett WC. Trans fatty acids and cardiovascular disease. The New England Journal of Medicine. 2006;354(15):1601–1613. https://doi.org/10.1056/NEJMra054035

12. Zholdin BK, Yeshniyazov NB, Medovchshikov VV, *et al*. Modified risk factors and their influence on the development of cardiovascular diseases. West Kazakhstan Medical Journal. 2017;(1):4–12. (In Russ.) https://elibrary.ru/YTGIOZ

13. Starodubova AV. Can healthy eating be considered a health-preserving tool? Herald of the Russian Academy of Sciences. 2022;92(2):162–170. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0869587322020098

14. Starodubova AV, Chazova IE, Tutelyan VA, Nikityuk DB, Pavlovskaya EV, *et al*. Eurasian clinical practice guidelines for dietary management of cardiovascular diseases (2024). Eurasian heart journal. 2024;(4):6–67. (In Russ.) https://doi.org/10.38109/2225-1685-2024-4-6-66

15. Alyavi BA, Abdullaev AH, Dalimova DA, *et al*. Diet as an important factor in the prevention and treatment of cardiovascular diseases. Journal of cardiorespiratory research. 2021;2(2):9–15. (In Russ.) http://dx.doi.org/10.26739/2181-0974-2021-2-1

16. Unhapipatpong C, Shantavasinkul PC, Kasemsup V, *et al*. Tropical oil consumption and cardiovascular disease: An umbrella review of systematic reviews and meta analyses. Nutrients. 2021;13(5):1549. https://doi.org/10.3390/nu13051549

17. Jakobsen MU, Trolle E, Outzen M, Mejborn H, Grønberg MG, *et al*. Intake of dairy products and associations with major atherosclerotic cardiovascular diseases: a systematic review and meta-analysis of cohort studies. Scientific Reports. 2021; 11(1):1303. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79708-x

18. Feingold KR. The effect of diet on cardiovascular disease and lipid and lipoprotein levels. Endotext. South Dartmouth: MDText.com, Inc.; 2024.

19. Zhao Y, Khalesi H, He J, Fang Y. Application of differrent hydrocolloids as fat replacer in low-fat dairy products: Ice cream, yogurt and cheese. Food Hydrocolloids. 2023;138:108493. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108493

20. Marchetti L, Andres SC. Use of nanocellulose in meat products. Current Opinion in Food Science. 2021;38:96–101. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.11.003

21. Syan V, Kaur J, Sharma K, Patni M, Rasane P, *et al*. An overview on the types, applications and health implications of fat replacers. Journal of Food Science and Technology. 2024;61:27–38. https://doi.org/10.1007/s13197-022-05642-7

22. Arnett DK, Blumenthal RS, Albert MA, Buroker AB, Goldberger ZD, *et al*. 2019 ACC/AHA guideline on the primary prevention of cardiovascular disease: A report of the American college of cardiology/American heart association task force on clinical practice guidelines. Circulation. 2019;140(11):e596–e646. https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000678

23. Piepoli MF, Abreu A, Albus C, Ambrosetti M, Brotons C, *et al*. Update on cardiovascular prevention in clinical practice: A position paper of the European association of preventive cardiology of the European society of cardiology. European Journal of Preventive Cardiology. 2020;27(2);181–205. https://doi.org/10.1177/2047487319893035

24. Abd El-Wahed EM, Hassanien MFR. Chemical, rheological and sensory characteristics of processed cheese spread analogues. Carpathian Journal of Food Science and Technology. 2019;11(1):135–148.

25. Briggs MA, Petersen K, Kris-Etherton P. Saturated fatty acids and cardiovascular disease: Replacements for saturated fat to reduce cardiovascular risk. Healthcare. 2017;5(2):29. https://doi.org/10.3390/healthcare5020029

26. Leong TSH, Ong L, Gamlath CJ, Gras SL, Ashokkumar M, *et al*. Formation of cheddar cheese analogues using canola oil and ultrasonication – A comparison between single and double emulsion systems. International Dairy Journal. 2020; 105:104683. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104683

27. McSweeney P, Fox PF, Cotter PD, Everett DW. Cheese: Chemistry, physics and microbiology: Fourth edition. 4th ed. USA: Elsevier; 2017. 1203 p.

28. Gómez-Cortés P, Juárez M, de la Fuente MA. Milk fatty acids and potential health benefits: An updated vision. Trends in Food Science & Technology. 2018;81:1–9. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.014

29. Thitame SN, Aher AA. Algal biomolecules in cardiovascular disease: A review of current evidence and emerging therapeutic avenues. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences. 2025;17(Suppl. 1):S12–S15. https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_1760_24

30. Cho C-H, Lu Y-A, Kim M-Y, Jeon Y-J, Lee S-H. Therapeutic potential of seaweed-derived bioactive compounds for cardiovascular disease treatment. Applied Sciences. 2022;12(3):1025. https://doi.org/10.3390/app12031025

31. Kumari A, Garima, Bharadvaja N. A comprehensive review on algal nutraceuticals as prospective therapeutic agent for different diseases. 3 Biotech. 2023;13(2):44. https://doi.org/10.1007/s13205-022-03454-2

Additional information about the authors / Дополнительная информация об авторах

Elena S. Simonenko / Симоненко Елена Сергеевна ORCID 0000-0002-2878-8069; eLIBRARY SPIN 8486-6017
Sergey V. Simonenko / Симоненко Сергей Владимирович ORCID 0000-0002-6999-5048; eLIBRARY SPIN 4079-3763
Tatiana S. Zaletova / Залетова Татьяна Сергеевна ORCID 0000-0002-3492-1778; eLIBRARY SPIN 6492-1290
Anatoly A. Khitrov / Хитров Анатолий Анатольевич ORCID 0009-0004-1599-3209
Elena S. Semenova / Семенова Елена Сергеевна ORCID 0000-0003-3848-7478; eLIBRARY SPIN 6632-8609
Anna V. Begunova / Бегунова Анна Васильевна ORCID 0000-0002-5360-8955; eLIBRARY SPIN 1155-4050
Irina S. Samsonova / Самсонова Ирина Сергеевна ORCID 0009-0000-2244-9851; eLIBRARY SPIN 9457-1718

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2605
https://elibrary.ru/TXNZYJ

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Установление критериев подлинности меда с использованием методов изотопной масс-спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой

Л. А. Оганесянц, А. Л. Панасюк, Д. А. Свиридов*, М. Ю. Ганин

Всероссийский научно-исследовательский институт пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 20.06.2025
Принята после рецензирования: 14.08.2025
Принята к публикации: 02.09.2025

**e-mail: labvin@yandex.ru*
© Л. А. Оганесянц, А. Л. Панасюк, Д. А. Свиридов, М. Ю. Ганин, 2025

Аннотация.
Мед является неотъемлемой частью продуктовой корзины широких слоев населения. На сегодняшний день высока доля фальсифицированных образцов, представленных на продовольственном рынке. Используемые в настоящее время методы оценки подлинности меда не всегда позволяют выявить фальсифицированную продукцию. Цель исследования – выявить набор параметров методами изотопной масс-спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, по значениям которых возможно выявление фальсифицированных образцов меда.
Исследовано 54 образца меда различного ботанического и географического происхождения, а также 25 образцов сахаров и сахаросодержащих добавок из различного сырья. В исследуемых образцах на основе значений изотопных характеристик общего углерода (брутто) и отдельно белковой фракции рассчитана доля экзогенных сахаров из С4-типа растений. С целью возможной оценки подлинности ботанического и географического происхождения в образцах измерены массовые концентрации 71 элемента с использованием масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.
Преимущество предложенного метода в сравнении с общепринятым заключается в возможности дополнительно устанавливать присутствие свекловичных сахаров в меде, а также в более простой пробоподготовке, не требующей использования реактивов. Элементный профиль меда разнообразен и представлен широким набором показателей. При этом 22 элемента не обнаружены (Be, Sm, V, Eu, Cr, As, Se, Rh, Pd, Sb, Tb, Er, Tm, Re, Ir, Pt, Lu, Ho, Au, Hg, Te, Bi). Качественное и количественное содержание элементов в некоторых образцах отличалось от других, что, скорее всего, связано больше с ботаническим происхождением, чем с географическим. Так, некоторые образцы достаточно дорогих видов меда (сосновый, падевый, манука, разнотравья с высоким содержанием пади и пыльцы каштана) характеризуются высоким содержанием ряда элементов (Zn, Cu, Al, Mn и др.).
Использование установленных критериев при оценке подлинности меда в перспективе позволит значительно сократить долю фальсифицированного меда как потребляемого в свежем виде, так и используемого для производства медовых напитков.

Ключевые слова. Мед, фальсификация, идентификация, сахаросодержащие добавки, экзогенные сахара, изотопная масс-спектрометрия, ботаническое происхождение, географическое место происхождения

Для цитирования: Оганесянц Л. А., Панасюк А. Л., Свиридов Д. А., Ганин М. Ю. Установление критериев подлинности меда с использованием методов изотопной масс-спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 755–766. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2605

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2605
https://elibrary.ru/TXNZYJ

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

Isotope Mass Spectrometry and Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry in Honey Authentication

Lev A. Oganesyants, Alexander L. Panasyuk, Dmitriy A. Sviridov*, Mikhail Yu. Ganin

All-Russian Scientific Research Institute of Brewing, Beverage and Wine Industry, Moscow, Russia

Received: 20.06.2025
Revised: 14.08.2025
Accepted: 02.09.2025

**e-mail: labvin@yandex.ru*

© L.A. Oganesyants, A.L. Panasyuk, D.A. Sviridov, M.Yu. Ganin, 2025

Abstract.
Honey is a popular product and one of the most faked foods in the world. Current authentication methods remain rather ineffective. In this study, isotope radio mass spectrometry (IRMS) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) made it possible to reveal a set of criteria that could be used to identify fake honey.

The research featured 54 samples of honey of various botanical and geographical origin, as well as 25 samples of sugars and sugar-containing additives. By obtaining the isotopic profile of total carbon and the protein fraction, the authors calculated the proportion of exogenous sugars from C4 plants. The ICP-MS method was used to assess the botanical and geographical profile based on the mass concentrations of 71 elements.

The method was able to detect the presence of beet sugars; the sample preparation did not require reagents. The elemental profile proved diverse and involved a wide range of parameters. However, 22 elements were not detected (Be, Sm, V, Eu, Cr, As, Se, Rh, Pd, Sb, Tb, Er, Tm, Re, Ir, Pt, Lu, Ho, Au, Hg, Te, Bi). The qualitative and quantitative differences in elemental content were most likely associated with the botanical origin, not the harvesting location. Some samples of expensive honeys (pine, honeydew, manuka, herbs with honeydew and chestnut pollen, etc.) were rich in Zn, Cu, Al, Mn, etc.

The new criteria may simplify the procedure of honey authentication and reduce the share of fake honey on the market as a separate product or a formulation ingredient in mead beverages.

Keywords. Honey, food adulteration, identification, sugar-containing additives, exogenous sugars, isotope mass spectrometry, botanical origin, geographical origin

For citation: Oganesyants LA, Panasyuk AL, Sviridov DA, Ganin MYu. Isotope Mass Spectrometry and Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry in Honey Authentication. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):755–766. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2605

Введение

Пчеловодство – это отрасль сельского хозяйства, связанная с разведением пчел и уходом за ними с целью получения таких продуктов, как мед, воск, прополис, пчелиный яд и др. Данные продукты обеспечивают как внутренний рынок, так и экспортную базу. В России пчеловодство имеет глубокие исторические корни и играет важную роль в аграрном секторе страны. Активное развитие промышленного пчеловодства началось в XIX–XX вв. При этом традиционные методы, такие как использование дупляных ульев и бортей, долгое время сочетались с более современными пасеками и рамочными системами. Большая часть продуктов пчеловодства представлена непосредственно пчелиным медом, который обладает набором ценных качеств [1–4]. Кроме того, пчелы вносят значительный вклад в сельское хозяйство, способствуя опылению культурных растений. Производство меда в мире на сегодняшний день достигает 1,2 млн т в год, однако даже этого количества недостаточно, чтобы удовлетворить спрос рынка [5].

Мед является сложным природным продуктом, который характеризуется разнообразным химическим составом, включающим в себя углеводы, витамины, минеральный комплекс, полифенолы, ферменты, аминокислоты, антиоксиданты и другие физиологически важные соединения. В общей сложности в меде может содержаться до 300 различных компонентов, треть из которых присутствует в каждом натуральном образце меда. Основной компонент меда – углеводы (составляют до 95 % общего объема), представляющие собой преимущественно простые сахара (глюкоза и фруктоза). Витамины в меде представлены в основном группой В, в том числе тиамином, рибофлавином, ниацином, пантотеновой кислотой и пиридоксином. Минеральный комплекс включает кальций, магний, калий, натрий, железо и цинк. Азотистые соединения составляют около 1 % от общей массы меда. Ферменты

представлены в основном диастазой и инвертазой. Они участвуют в расщеплении углеводов до более простых форм, способствуя активизации обмена веществ. Антиоксидантные свойства меда обеспечиваются главным образом рядом фенольных веществ, в том числе кверцетином, галловой, п-кумаровой кислотой и некоторыми другими соединениями. Таким образом, химический состав меда обуславливает высокие пищевые, профилактические и иммуномодулирующие свойства. Мед является сырьем для ряда алкогольных и безалкогольных напитков. Использование поддельного меда при производстве медовых напитков, сбитней и медовухи приведет к тому, что конечный продукт не будет соответствовать предъявляемым требованиям.

В связи с этим проведение исследований, направленных на выявление критериальных параметров, позволяющих подтвердить подлинность меда и продуктов на его основе, является особо важным в рамках обеспечения населения продуктами питания надлежащего качества, а также защиты интересов добросовестных производителей продукции пчеловодства.

Подлинность меда, как и любого другого пищевого продукта, является важнейшим критерием качества и обуславливает его безопасность и здоровую рыночную конкуренцию. На сегодняшний день при идентификации меда используют широкий спектр инструментальных методов анализа, в том числе ВЭЖХ, ГХ/ГХ-МС, ТСХ/ВЭТСХ, спектроскопические и др. [6–8].

Среди инструментальных методов стоит выделить изотопную масс-спектрометрию (SIRA), которая является надежным инструментом при оценке качества и подлинности широкого ряда пищевых продуктов [9, 10]. Этот метод часто незаменим в случаях, когда физико-химические свойства фальсификата оказываются идентичными оригинальному продукту.

Основным видом фальсификации меда остается внесение сахаросодержащих веществ в продукт. Для этой цели обычно используют сиропы, полученные из растений с С4-типом фотосинтеза, таких как кукуруза и сахарный тростник. Значительная разница изотопной сигнатуры элементов в составе С3- и С4-растений (и продуктах их переработки) открывает широкие возможности для использования метода изотопной масс-спектрометрии при идентификации меда. Особый интерес в рамках вопроса идентификации меда представляет его белковая составляющая. В натуральном меде белковая и углеводная составляющие образуются одновременно из одного источника. Поэтому значения показателя $\delta^{13}C$ в них должны находиться в схожих диапазонах. Эта особенность позволяет существенно снизить предел обнаружения экзогенных сахаров из С4-растений в меде. Так, различие значений показателя $\delta^{13}C$ белков более чем на 1 ‰ свидетельствует о фальсификации меда [9, 11]. Кроме того, немецкие ученые [12] предложили способ выявления фальсификата маточного молочка, основываясь на значениях показателя $\delta^{15}N$ в выделенном из него белке. Данное исследование имеет особую значимость ввиду высокой стоимости маточного молочка и, как следствие, большой доли фальсификатов на потребительском рынке.

Другим важным вопросом является установление ботанического и географического происхождения меда. Подлинность меда по его ассортиментному признаку является одним из наиболее важных элементов как в обеспечении здоровой конкуренции среди производителей, так и в защите интересов потребителей. На сегодняшний день при идентификации ботанического происхождения меда наибольшее распространение получили органолептический (сенсорный) и палинологический (пыльцевой) методы анализа. Цель органолептического метода – оценить внешний вид, аромат и вкус меда. Палинологический метод анализа основан на диагностике видовой принадлежности пыльцы. Учитывая трудности, связанные с традиционной палинологией, в качестве альтернативы разрабатывают новые аналитические методологии для определения ботанического происхождения меда, в том числе основанные на инструментальных методах анализа.

Географическое происхождение меда представляет собой важный фактор, влияющий на формирование его физико-химического состава и уникальных свойств. Так, образцы меда из идентичных ботанических источников могут демонстрировать значительные различия в составе в зависимости от таких факторов, как климатические условия, минеральный состав почвы, особенности растений-медоносов, породы пчел и др. В связи с этим многие исследователи подчеркивают важность установления подлинности ботанического и географического происхождения меда на основе выявления уникальных характеристик. Данный принцип идентификации предполагает создание базы данных, с помощью которой будет проводиться сравнение значений, полученных для исследуемых образцов меда [13].

Цель исследования – выявить набор параметров методами изотопной масс-спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, по значениям которых возможно выявление фальсифицированных образцов меда.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись 54 образца меда различного ботанического и географического происхождения (табл. 1), 25 образцов сахаров и сахаросодержащих веществ.

Выделение белковой фракции меда проводили по европейскому протоколу AOAC 998.12. [14–17]. Отсутствие белка в пробе может служить одним из признаков его недоброкачественности [18]. В натуральном меде, как правило, присутствуют белки, за исключением некоторых редких сортов цитрусового меда.

Для опредения соотношения изотопов углерода и азота применяли изотопный масс-спектрометр Delta Advantage V (Thermo Fisher Scientific, США)

со вспомогательными дополнительными модулями Conflo IV и Flash IRMS того же производителя. Пробы подавались в элементный анализатор через автодозатор для твердых проб, при этом анализ одной пробы длился около 10 мин. Для калибровки ориентировались на следующие эталонные стандарты геологической службы США (USGS) и МАГАТЭ: вьетнамский мед USGS82, канадский мед USGS83, кофеин IAEA 600 и масло NBS22.

Для определения изотопного состава элементов этилового спирта использовали изотопный масс-спектрометр с автосамплером AI-AS 1300 для жидких проб (Thermo Scientific, США). В качестве калибровочных стандартов-эталонов применяли сертифицированные образцы воды МАГАТЭ-USGS и этилового спирта: VSMOW2, USGS47, SLAP2, BCR656. Анализ проводили в соответствии с методом, описанным в патенте RU 2 809 285 C1 (разработанном ВНИИПБиВП).

Таблица 1. Список исследуемых образцов меда

Table 1. Honey samples

№	Наименование меда	Место происхождения	№	Наименование меда	Место происхождения
1	Мед липовой	Московская область	28	Мед	Республика Дагестан
2	Мед разнотравный	Московская область	29	Мед горный-акациевый	Абхазия
3	Мед цветочный	Коломна	30	Мед	Алтайский край, поселок Березовка
4	Мед гречишный	Коломна	31	Мед горный	Алтайский край
5	Мед	Дмитров	32	Мед падевый	Республика Якутия
6	Мед гречишный	Дмитров	33	Мед разнотравный-падеевый	Республика Якутия
7	Мед клюквенный	Костромская область	34	Мед весенний	Дальний восток, Уссурийский район
8	Мед	Рязанская область	35	Мед	Дальний восток, Хабаровск
9	Мед подсолнечниковый	Рязанская область, Захаровский район	36	Мед липовый	Дальний Восток, Уссурийский район
10	Мед гречишный	Рязанская область, Касимов	37	Мед разнотравный	Дальний Восток, поселок Житково
11	Мед донниковый	Рязанская область, Скопинский район	38	Мед диморфантовый	Приморский край, поселок Санаторная
12	Мед разнотравье	Смоленская область, деревня Агеевщина	39	Мед женьшеневый	Дальний Восток
13	Мед	Липецкая область	40	Мед	Дальний Восток, Уссурийский район
14	Мед липовый	Орловская область	41	Мед падевый	Республика Якутия, Мирный
15	Мед гречишный	Тамбовская область	42	Мед	Приморский край, Уссурийский район
16	Мед кориандровый	Белгородская область, Алексеевка	43	Мед лесное разнотравье	Дальний Восток, Уссурийск
17	Мед разнотравье	Воронеж, поселок Алое Поле	44	Мед	Российская Федерация
18	Мед разнотравье	Оренбург	45	Мед	Российская Федерация
19	Мед кориандровый	Краснодарский край	46	Мед	Российская Федерация
20	Мед разнотравный-кориандровый	Краснодарский край	47	Мед	Российская Федерация
21	Мед акациевый	Краснодарский край, Александровский хутор	48	Мед цветочный	Европа, Австрия
22	Мед липовый	Краснодарский край	49	Мед разнотравье	Киргизия, Джумгал
23	Мед акациевый	Сочи	50	Мед сосновый	Турция, Мармарис
24	Мед цветочный-горные цветы	Республика Адыгея	51	Мед сосновый	Турция
25	Мед липовый-подсолнечниковый	Республика Адыгея	52	Мед	США, штат Невада
26	Мед	Башкирия, Уфимский район, село Николаевка	53	Мед	США, штат Аризона
27	Мед	Республика Чечня	54	Мед Манука	Австралия

Пробы подготавливали следующим образом: мед или сахарные сиропы растворяли в воде в соотношении 1:5 и сбраживали при помощи сухих дрожжей вида *Sacharomyces cerevisiae*. В круглодонную колбу (50 см^3) вносили 25 см^3 исследуемой пробы (сброженной) и производили дистилляцию с дефлегмацией при температуре 78,2–78,5 °С. Сбор дистиллята продолжали до полного рекуперирования (98 %) общего этанола из пробы.

В исследуемых образцах определяли массовую концентрацию 71 элемента методом ИСП-МС (X-7, Thermo Elemental, США). Режим работы детектора – двойной; режим сканирования – Survey Scan и Peak Jumping; распылитель концентрический – PolyCon; распылительная камера – кварцевая, охлаждаемая (3 °С). Определение содержания элементов в образцах проводили количественным методом с использованием эталонных растворов, содержащих от 1 до 500 мкг/дм^3 определяемых элементов.

Результаты и их обсуждение

В рамках проведенной работы измеряли значения изотопных характеристик углерода в образцах меда (брутто) и отдельно его белковой фракции. Добавление сахаров, произведенных из кукурузы или сахарного тростника (растений С4-типа), приводит к изменению изотопных соотношений элементов общих сахаров в составе полученного продукта, но не влияет на изотопное соотношение элементов в составе белков. В натуральном меде соотношение изотопов углерода в сахарах и белках должно совпадать. В оригинальной формуле из применяемой методики, разработанной Международной ассоциацией аналитической химии [14–17], за эталон расчета взяли кукурузный сироп с высоким содержанием фруктозы. В рамках данного исследования пересчет производился на основе экспериментальных значений изотопных характеристик углерода сахаров, произведенных не только из кукурузы (кукурузной патоки, сиропов), но и из сахарного тростника, который получил широкое распространение в России в качестве сахаросодержащей добавки. В таблице 2 приведены результаты изучения изотопных характеристик общего углерода (брутто) в составе тростникового и кукурузного сахара различного происхождения.

Значения изотопных характеристик углерода в составе сахаров из тростника и кукурузы находятся в диапазоне от –13,34 до –11,55 ‰. Для расчета доли внесенных экзогенных сахаров в мед рассчитано среднее значение δ^{13}С, которое составило –12,15 ‰. Таким образом, согласно методу AOAC 998.12 [16], формула по расчету доли добавки С4-сахаров (%) в мед приобретает следующий вид:

$$\text{С4-сахара} = \left(\frac{\delta^{13}C_{б} - \delta^{13}C_{м}}{\delta^{13}C_{б} - (-12{,}15)} \right)$$

где $\delta^{13}C_{б}$ – значение δ^{13}С для белковой части меда; $\delta^{13}C_{м}$ – значение δ^{13}С для меда (брутто); –12,15 – среднее значение δ^{13}С для сиропа из тростникового или кукурузного сахара (сиропа).

Исходя из полученных результатов, а также используя данные, опубликованные в предыдущей работе [18], можно сделать вывод, что добавление 6 % инвертного тростникового (кукурузного) сиропа в мед способно обуславливать разницу в значениях δ^{13}С меда (брутто) и его белковой фракции в диапазоне 0,9–1,0 ‰. Поэтому мед можно считать подозрительным, если процент содержания С4-сахара в образце меда больше 6 % или меньше –6 %, согласно формуле.

В рамках проведенной работы отобрано 54 образца меда (табл. 1) различного географического и ботанического происхождения. Изучили их показатели изотопных отношений углерода δ^{13}С в меде (брутто) и показатели изотопных отношений углерода δ^{13}С и δ^{15}N в белковой фракции меда. Для расчета степени

Таблица 2. Значения показателей изотопных характеристик углерода сахаросодержащих веществ различного происхождения

Table 2. Isotopic profile of carbon in sugar-containing substances

Наименование образца	Место происхождения	$\delta^{13}C_{VPDB}$, ‰
Сахар тростниковый	Колумбия	–11,55 ± 0,04
Сахар тростниковый	Российская Федерация	–12,12 ± 0,11
Сахар тростниковый	Франция	–12,02 ± 0,30
Сахар тростниковый	Куба	–12,23 ± 0,10
Сахар тростниковый	Тайланд	–12,40 ± 0,25
Сахар тростниковый	Турция	–13,01 ± 0,12
Сахар коричневый тростниковый кусковой	Бразилия	–12,33 ± 0,23
Сахар белый тростниковый леденцовый	Южная Америка	–13,34 ± 0,05
Сахар коричневый тростниковый леденцовый	Южная Америка	–12,43 ± 0,02
Сахар коричневый тростниковый кристаллический Демерара	Кооперативная Республика Гайана	–12,61 ± 0,02
Кукурузный сироп	Южная Корея	–11,95 ± 0,12
Патока крахмальная кукурузная	Российская Федерация	–12,03 ± 0,09
ГФС-42	Российская Федерация	–12,25 ± 0,14

содержания в образцах внесенных сахаров использовали формулу. Результаты представлены в виде BoxPlot-диаграмм на рисунке 1.

Полученные значения показателя δ^{13}C меда (брутто) находились в диапазоне от –29,17 до –20,52 ‰, значения δ^{13}C белковой фракции – от –29,17 до –23,87 ‰. Значения показателя отношений изотопов азота белковой фракции зафиксированы в диапазоне от –2,78 до 9,29 ‰. Согласно анализу полученных данных в соответствии с формулой (1), в 6 образцах меда выявлено присутствие экзогенных сахаров. Данные представлены в таблице 3.

Расчетная доля внесенных сахаров составила для различных образцов от 6,52 до 33,70 %. В четырех образцах (№ 2–4, 18) с выявленными экзогенными сахарами значения показателя δ^{13}C меда (брутто) выше, чем –23,5 ‰, что согласуется с выводами работ [16–19], в которых указано, что в при значениях δ^{13}C меда (брутто) выше –23,5 ‰ с высокой долей вероятности образцы являются фальсификатом.

Значения показателя δ^{15}N в исследуемых 54 образцах меда в ряде случаев имели достаточно высокие значения, превышающие 6 ‰. В то же время значения показателя δ^{15}N в 6 образцах находились в области отрицательных чисел. В исследованиях [20, 21] такой разброс значений связывают с наличием лесных массивов и количеством годовых осадков в ареале обитания пчел, что существенно влияет на изменение изотопных характеристик отношений изотопов азота в меде.

Данный способ выявления экзогенных сахаров в меде является эффективным при выявлении именно кукурузного или тростникового сахаров. При фальсификации меда с использованием сахаров С3 происхождения, например свекловичного, рассматриваемый метод будет малоэффективен ввиду схожести значений δ^{13}C. В связи с этим ВНИИПБиВП предложен метод, направленный на изучение отношений стабильных изотопов углерода, водорода и кислорода выделенного этанола в результате ферментации сахаров, который широко применяется при идентификации алкогольной продукции [13, 22–24]. Такой подход учитывает не только разницу в значениях δ^{13}C сахаров различных растений, но и разницу в значениях δ^{18}O и δD. В таблице 4 представлены значения изотопных характеристик элементов этанола, выделенного в результате ферментации сахаросодержащих веществ из различных видов растений.

Значения δ^{13}C выделенного этанола после ферментации сахаросодержащих добавок из кукурузы и тростника лежат в диапазоне от –12,61 до –10,87 ‰.

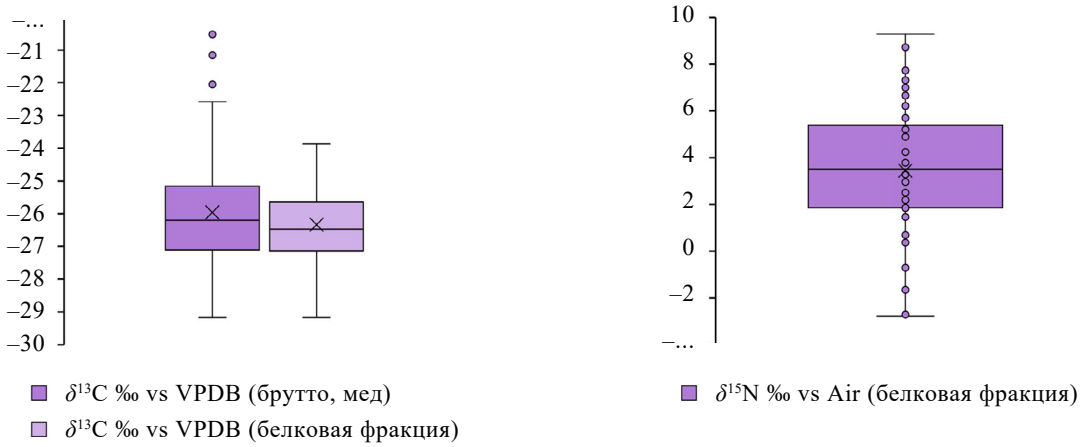


Рисунок 1. Значения δ^{13}C меда (брутто), δ^{13}C и δ^{15}N белковой фракции

Figure 1. Carbon isotope ratios δ^{13}C in honey (gross), δ^{13}C, and δ^{15}N in protein fraction

Таблица 3. Результаты исследований образцов меда различного происхождения

Table 3. Research results across honey samples

№	Наименование меда	Место происхождения	$\delta^{15}N_{Air}$, ‰, белковая фракция	$\delta^{13}C_{VPDB}$, ‰, мед (брутто)	$\delta^{13}C_{VPDB}$, ‰, белковая фракция	Расчетная доля внесенных сахаров в пересчете на тростниковый, %
2	Мед разнотравье	Московская область	5,20 ± 0,05	–22,05 ± 0,10	–25,71 ± 0,05	26,99
3	Мед цветочный	Коломна	6,83 ± 0,07	–21,16 ± 0,14	–25,74 ± 0,02	33,70
4	Мед гречишный	Коломна	6,41 ± 0,10	–20,52 ± 0,42	–24,58 ± 0,64	32,66
18	Мед разнотравье	Оренбург	6,36 ± 0,07	–22,58 ± 0,02	–25,91 ± 0,04	24,20
46	Мед	Российская Федерация	5,09 ± 0,50	–24,01 ± 0,05	–26,57 ± 0,10	17,80
47	Мед	Российская Федерация	4,46 ± 0,60	–27,06 ± 0,04	–28,10 ± 0,10	6,52

Таблица 4. Значения изотопных характеристик углерода, кислорода и водорода в этаноле ферментированных образцов сахаросодержащих веществ

Table 4. Isotopic profile of carbon, oxygen, and hydrogen in ethanol of fermented sugar-containing substances

№	Наименование образца	Место происхождения	$\delta^{13}C_{VPDB}$, ‰	$\delta^{18}O_{VSMOW}$, ‰	$\delta^{2}H_{VSMOW}$, ‰
1	Глюкозный сироп, кукурузный	Краснодар	–12,06 ± 0,03	13,37 ± 0,10	–221,39 ± 0,97
2	Глюкозный сироп 43 %, кукурузный	Ижевск	–12,14 ± 0,05	12,54 ± 0,03	–220,70 ± 0,46
3	Глюкозный сироп Shine, сироп из кукурузы	–	–12,61 ± 0,03	11,13 ± 0,14	–234,56 ± 0,23
4	Сахар коричневый тростниковый кусковой	Бразилия	–11,24 ± 0,06	8,95 ± 0,11	–237,53 ± 1,26
5	Сахар белый тростниковый леденцовый	Южная Америка	–11,26 ± 0,10	9,01 ± 0,11	–240,25 ± 1,02
6	Сахар коричневый тростниковый леденцовый	Южная Америка	–11,14 ± 0,06	7,28 ± 0,18	–242,38 ± 0,34
7	Сахар коричневый тростниковый кристаллический Демерара	Кооперативная Республика Гайана	–10,87 ± 0,06	9,46 ± 0,11	–232,60 ± 1,88
8	Глюкозный сироп 43 %	Домодедово	–24,80 ± 0,03	10,00 ± 0,04	–227,72 ± 0,47
9	Сироп «фруктозно-глюкозный»	Новокузнецк	–23,09 ± 0,03	7,53 ± 0,02	–224,43 ± 0,43
10	Сахар свекловичный (категория ТС2)	Российская Федерация	–26,47 ± 0,01	6,23 ± 0,16	–270,80 ± 0,76
11	Меласса свекловичная	Российская Федерация	–26,46 ± 0,02	3,76 ± 0,29	–283,64 ± 0,86
12	Рисовый сироп	Европа	–28,33 ± 0,10	15,80 ± 0,08	–262,01 ± 0,63

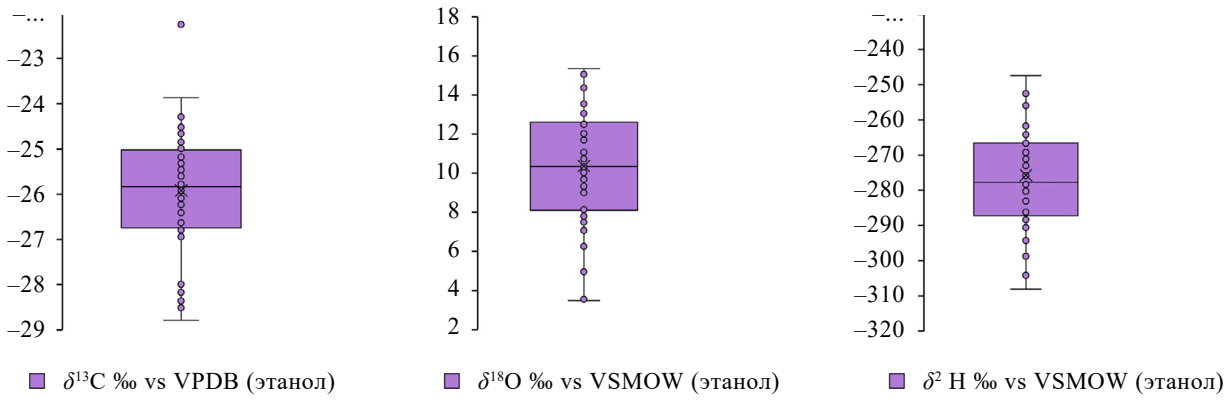


Рисунок 2. Диапазоны значений $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в этаноле ферментированных образцов меда

Figure 2. Value ranges of $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$, and $\delta^{2}H$ in ethanol of fermented sugar-containing substances

Изотопные характеристики углерода этанола, полученного из сахаров натурального меда, характеризуются более низкими значениями, которые существенно изменяются при внесении в мед сахаров кукурузного или тростникового происхождения. Значения изотопных характеристик водорода в данных образцах находились в диапазоне от –242,38 до –220,70 ‰. Это превышает типичные значения для натурального меда, что может являться дополнительным идентификационным показателем. При этом сахара свекловичного происхождения характеризуются высоким содержанием «легкого» изотопа ^{16}O. Соответственно, показатель $\delta^{18}O$ также может выступать в качестве идентификационного критерия при установлении присутствия свекловичных сахаров в меде.

На следующем этапе работы все отобранные образцы меда сбраживали с использованием сухих дрожжей. Полученные значения изотопных характеристик элементов (углерода, кислорода, водорода) выделенного этанола из ферментированных образцов меда представлены в виде BoxPlot-диаграмм на рисунке 2.

Результаты исследования 54 образцов меда (табл. 1) показали, что значения показателя $\delta^{13}C$ выделенного этанола находились в диапазоне от –28,36 до –20,47 ‰. Значения $\delta^{18}O$ лежали в диапазоне от 3,48 до 15,06 ‰; $\delta^{2}H$ – от –308,1 до –208,43 ‰ соответственно. Измеренные значения большинства образцов являются типичными для этанола, полученного в результате ферментации натурального меда, за исключением нескольких образцов. Как указывалось ранее, подлинность образов, в которых были выявлены значения изотопных характеристик углерода от –23,5 ‰ и более, вызывает сомнения. Кроме того, образцы со значениями $\delta^{18}O$ этанола 8 ‰ и менее могут содержать

в своем составе свекловичные сахара. Значения изотопных характеристик углерода, кислорода и водорода, полученные для образцов, вызывающих сомнение в подлинности, представлены в таблице 5.

Жирным шрифтом в таблице 5 отмечены нехарактерные для натуральных образцов меда значения показателей изотопных характеристик элементов. Образцы № 2–4 и 18 также были оценены как фальсификаты с использованием метода AOAC 998.12. При этом образцы № 16 и 17 имели значения $\delta^{13}C$ более чем –25,0 ‰. Однако в них получены низкие значения $\delta^{18}O$, которые характерны для продукта с высоким содержанием этанола свекловичного происхождения. Соответственно, данные образцы могли быть приготовлены с добавлением свекловичных сиропов или мелассы, либо пчел, производивших рассматриваемые образцы, подкармливали сиропами свекловичной природы. У образца № 18 пограничное значение $\delta^{13}C$ = –24,23 ‰. Кроме того, значения показателей $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ свидетельствует о возможном внесении в мед сахаросодержащих веществ свекловичной природы (образцы № 10, 11; табл. 4). Значения изотопных характеристик углерода, кислорода и водорода этанола, полученного из некоторых видов сахаросодержащих добавок из С3-типа растений, могут входить в диапазоны, характерные для натурального меда. Так, выявление присутствия рисового сиропа (№ 12; табл. 4) в меде при помощи данных методик затруднительно ввиду схожести значений изотопных характеристик всех трех исследуемых элементов в составе сахаров. В данном случае может потребоваться разработка дополнительных идентификационных критериев. Впрочем, стоимость рисового сиропа на российском рынке весьма высокая и зачастую выше стоимости натурального меда [25]. В связи с этим практика фальсификации натурального меда сиропами такого рода экономически нецелесообразна.

Другим важным вопросом в рамках идентификации меда является подтверждение подлинности его ботанического и географического происхождения. Исходя из полученных результатов, можно заключить, что значения изотопных характеристик элементов структурных компонентов меда не позволяют проводить классификацию образцов в зависимости от региона произрастания медоносов и их ботанического происхождения [26]. Принимая это во внимание, изучили массовые концентрации макро-, микро- и редкоземельных металлов в составе меда. В работе исследовали элементный профиль 39 образцов медов различного ботанического и географического происхождения. В исследованных образцах измерили массовые концентрации 71 элемента. 22 элемента не были выявлены ни в одном из образцов (Be, V, Cr, As, Se, Rh, Sb, Te, Sm, Eu, Tb, Ho, Er, Tm, Pd, Lu, Re, Ir, Pt, Au, Hg, Bi). Полученные данные обрабатывали с использованием статистических методов анализа. Результат представлен в виде диаграммы метода главных компонент на рисунке 3.

Большинство образцов локализованы совместно. Некоторые образцы разнесены от общего скопления. Однако локализации образцов непосредственно по географическому признаку не наблюдалось. При этом на диаграмме присутствует ряд образцов-аутлаеров меда различных географических мест происхождения. Так, образцы из Турции, Австралии и США в определенной степени разнесены от общей локализации образцов. Указанные образцы имеют специфическое ботаническое происхождение, поэтому различия в результатах анализа могут быть связаны именно с этим фактором. В связи с этим следует рассматривать полученные данные в совокупности с данными о ботанической принадлежности образцов меда. Из общего количества образцов выбрали те, которые имели известное ботаническое происхождение (разнотравье, липовый, акациевый, падевый, женьшеневый, подсолнечниковый, гречишный, диморфант, донниковый, кориандровый, сосновый, манука). Дополнительно исследовали элементный профиль образца глюкозофруктозного сиропа, который может быть использован с целью фальсификации меда. Результат представлен в виде диаграммы метода главных компонент на рисунке 4.

Как и на предыдущей диаграмме (рис. 3), большинство образцов также локализованы совместно,

Таблица 5. Значения изотопных характеристик углерода, кислорода и водорода в этаноле ферментированных образцов меда

Table 5. Isotopic profile of carbon, oxygen, and hydrogen in ethanol of fermented honey samples

№	Наименование меда	Место происхождения	$\delta^{13}C_{VPDB}$, ‰	$\delta^{18}O_{VSMOW}$, ‰	$\delta^{2}H_{VSMOW}$, ‰
2	Мед разнотравье	Московская область	**–22,45 ± 0,10**	12,74 ± 0,08	–266,67 ± 0,42
3	Мед цветочный	Коломна	**–22,25 ± 0,02**	10,34 ± 0,21	–247,39 ± 1,58
4	Мед гречишный	Коломна	**–20,47 ± 0,03**	8,35 ± 0,24	–252,51 ± 1,74
16	Мед кориандровый	Белгородская область, Алексеевка	–25,20 ± 0,06	**2,87 ± 0,09**	–261,11 ± 0,25
17	Мед разнотравный	Воронеж, поселок Алое Поле	–28,17 ± 0,02	**3,48 ± 0,72**	–272,98 ± 0,63
18	Мед разнотравный	Оренбург	–24,23 ± 0,04	**3,55 ± 0,23**	**–208,43 ± 2,55**

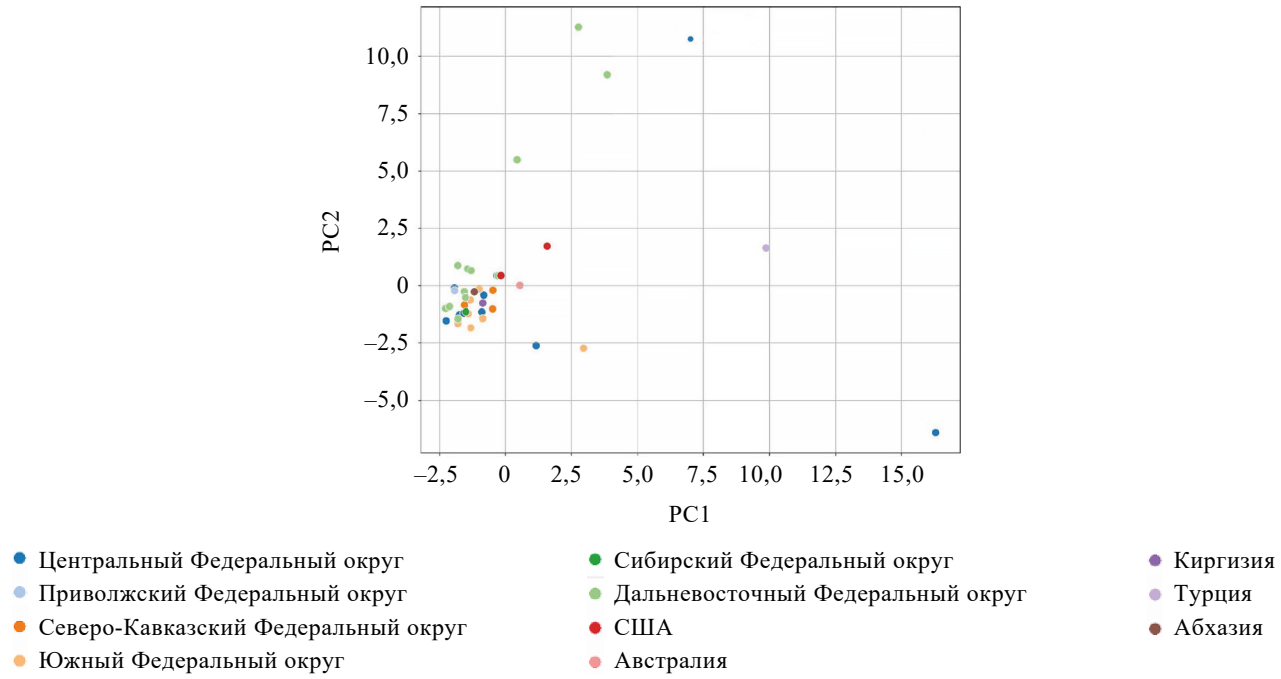


Рисунок 3. PCA-диаграмма элементного профиля и изотопных характеристик образцов меда различного географического происхождения

Figure 3. Elemental and isotopic profiles of honey samples from different locations

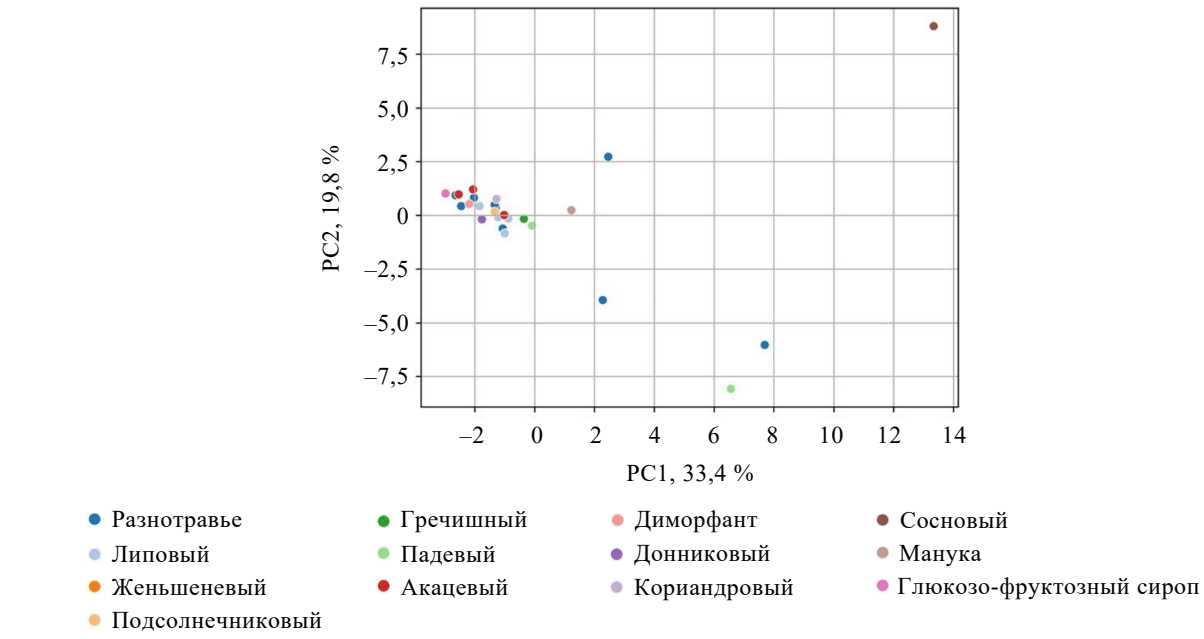


Рисунок 4. PCA-диаграмма элементного профиля образцов меда различного ботанического происхождения

Figure 4. Elemental profile of honey samples of different botanical origin

а некоторые образцы разнесены в пространстве признаков от общей локализации. Однако в данном случае видно, что образцы-аутлаеры представляют собой достаточно редкие виды меда: сосновый, падевый, манука. Также среди образцов-аутлаеров присутствуют образцы меда разнотравья. В этих образцах установлено высокое содержание пади либо кориандра. Исходя из этого, можно предположить, что именно особенности ботанического происхождения меда определяют специфичность элементного профиля. В результате аналитического исследования выявлено, что образец соснового меда характеризуется высокой концентрацией

элементов Mg, Al, P, S, Sc, Fe, Ni, Cu, Y, Sn, La, Ce, Pr, Nd, Gd, Dy, Yb, Th, U. Падевый мед – высокой концентрацией элементов Li, Na, Al, P, S, Co, Zn, Cd. Мед манука – Na, Al, Cs, Tl. По некоторым показателям (Zn, Cu, Al, Mn) разница в концентрациях между образцами различного ботанического происхождения может значительно различаться.

Более подробный анализ элементного профиля меда в зависимости от его ботанического происхождения представлен в предыдущей работе [27]. На рисунке 4 образец глюкозно-фруктозного сиропа занимает крайнюю левую позицию по первой главной компоненте. Стоит отметить малую концентрацию ряда элементов в этом образце, а также их небольшое разнообразие. В отличии от большинства образцов меда, в этом образце не выявлены элементы Li, B, S, Fe, Cu, Zn, Cs, а элементы K, Mg, Ca, Mn, Rb, Sr, Ba, Al находятся в наименьшей концентрации. Соответственно, при внесении сахаросодержащих сиропов в продукт концентрации ряда элементов будут существенно снижаться.

Выводы

Проблема фальсификации меда остается актуальной по всему миру, и, несмотря на высокий интерес исследователей к этому вопросу, нет единой методологии, которая позволила бы однозначно определить подлинность меда и продуктов его переработки. Результаты проведенных исследований подтверждают, что метод изотопной масс-спектрометрии является эффективным инструментом при выявлении фальсификации меда путем добавления экзогенных сахаров. Предложенный метод идентификации меда на основе значений изотопных характеристик углерода, кислорода и водорода выделенного после ферментации меда этанола имеет ряд преимуществ по сравнению с методом, описанным в AOAC 998.12. В частности, он позволяет не только выявлять мед с добавлением сиропов из С4-типа растений, но и в некоторых случаях обнаруживать присутствие сахаров из С3-типа растений, например, свекловичных.

Проведение анализа изотопных отношений элементов этилового спирта является менее сложным и трудозатратным методом в сравнении с анализом изотопных отношений общего углерода (брутто) и белковой фракции. Он не требует сложной пробоподготовки, реактивов, наличия твердофазного автосамплера, а также ручного капсулирования образцов. Элементный профиль может дать важную информацию о ботаническом и географическом происхождении образцов меда. Кроме того, массовые концентрации элементов в меде могут выступать в качестве дополнительного идентификационного критерия при выявлении экзогенных сахаров, т. к. внесение в мед сиропов снижает в образце концентрацию макро- и микроэлементов. Достоверная классификация меда по ботаническому и географическому происхождению может быть возможна при использовании статистических методов анализа и наличия достаточной выборки образцов.

Критерии авторства

Авторы в равной степени принимали участие в исследованиях и оформлении рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования научным оборудованием ИПТМ (Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН), на базе которого был выполнен анализ массовых концентраций макро-, микро- и редкоземельных металлов в образцах меда. А также благодарность Федеральному научному центру пчеловодства за предоставленные образцы меда.

Contribution

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

Conflict of interest

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

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the Federal Scientific Center of Beekeeping for providing the honey samples and the Center for Shared Use of Scientific Equipment, Institute of Microelectronics and High-Purity Materials, Russian Academy of Sciences, for helping with the elemental analysis.

Список литературы / References

1. da Silva PM, Gauche C, Gonzaga LV, Costa ACO, Fett R. Honey: Chemical composition, stability and authenticity. Food Chemistry. 2016;196:309–323. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.051

2. Cianciosi D, Forbes-Hernández TY, Afrin S, Gasparrini M, Reboredo-Rodriguez P, *et al*. Phenolic compounds in honey and their associated health benefits: A review. Molecules. 2018;23(9):2322. https://doi.org/10.3390/molecules23092322

3. Miguel MG, Antunes MD, Faleiro ML. Honey as a complementary medicine. Integrative Medicine Insights. 2017; 12:117863371770286. https://doi.org/10.1177/1178633717702869

4. Roshan A-RA, Gad HA, El-Ahmady SH, Abou-Shoer MI, Khanbash MS, *et al*. Characterization and discrimination of the floral origin of sidr honey by physicochemical data combined with multivariate analysis. Food Analytical Methods. 2017;10(1):137–146. https://doi.org/10.1007/s12161-016-0563-x

5. Эвершед Р., Темпл Н. Состав. Как нас обманывают производители продуктов питания. М.: Альпина Паблишер; 2017. 392 с. [Evershed R, Temple N. Composition. How food manufacturers deceive us. Moscow: Alpina Publisher; 2017. 392 p. (In Russ.)]

6. Petretto GL, Urgeghe PP, Mascia I, Fadda C, Rourk JP, *et al*. Stir bar sorptive extraction coupled with GC/MS applied to honey: Optimization of method and comparative study with headspace extraction techniques. European Food Research and Technology. 2016;243:735–741. https://doi.org/10.1007/s00217–016–2787–9

7. Seisonen S, Kivima E, Vene K. Characterisation of the aroma profiles of different honeys and corresponding flowers using solidphase microextraction and gas chromatography–mass spectrometry/olfactometry. Food Chemistry. 2015;169:34–40. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.125

8. Wu L, Du B, Heyden YV, Chen L, Zhao L, *et al*. Recent advancements in detecting sugar-based adulterants in honey – A challenge. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2017;86:25–38. https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.10.013

9. Vetrova OV, Kalashnikova DA, Melkov VN, Simonova GV. Detection of honey adulterations with sugar syrups by stable isotope mass spectrometry. Journal of Analytical Chemistry. 2017;72(7):756–760. https://doi.org/10.1134/S1061934817070152

10. Kalashnikova DA, Simonova GV. Ratios of stable isotopes $^{13}C/^{12}C$ and $^{15}N/^{14}N$ in samples of dead honey bees and beekeeping products. Journal of Analytical Chemistry. 2021;76(4):526–534. https://doi.org/10.1134/S1061934821040067

11. Талибова А. Г., Файнберг В. С., Ганин М. Ю., Федосеенко О. В., Мозговая С. С. и др. Применение изотопной масс-спектрометрии для выявления фактов фальсификации и определения места происхождения продуктов пчеловодства. Аналитика. 2021. Т. 11. № 3. С. 202–207. [Talibova AG, Feinberg VS, Ganin MYu, Fedoseenko OV, Mozgovaya SS, *et al*. The use of isotope mass spectrometry to identify the facts of falsification and determine the place of origin of bee products. Analytics. 2021;11(3):202–207. (In Russ.)] https://doi.org/10.22184/2227-572X.2021.11.3.202.207

12. Dinca O-R, Ionete RE, Popescu R, Costinel D, Radu G-L. Geographical and botanical origin discrimination of romanian honey using complex stable isotope data and chemometrics. Food Analitical Methods. 2015;8:401–412. https://doi.org/10.1007/s12161-014-9903-x

13. Oganesyants LA, Panasyuk AL, Sviridov DA, Egorova OS, Akbulatova DR, *et al*. A study of the elemental profiles of wines from the North-Eastern Coast of the Black Sea. Separations. 2024;11(5):148. https://doi.org/10.3390/separations11050148

14. White JW, Doner LW. Mass spectrometric detection of high fructose corn syrup in honey by $^{13}C/^{12}C$ ratio. A collaborative study. Journal of the Association of Official of Analytical Chemists. 1978;61:746–750.

15. White JW, Doner LW. The $^{13}C/^{12}C$ ratio in honey. Journal of Apicultural Research. 1978;17(2):94–99.

16. AOAC official methods of analysis. Method 998.12: C-4 plant sugars in honey, internal standard stable carbon isotope ratio method. USA: AOAC International; 1999;44:27–30.

17. Rogers KM, Cook JM, Krueger D, Beckmann K. Modification of AOAC *official method*℠ 998.12 to add filtration and/or centrifugation: Interlaboratory comparison exercis. Journal of AOAC International. 2013;96(3):607–614. https://doi.org/10.5740/jaoacint.12-386

18. Оганесянц Л. А., Панасюк А. Л., Кузьмина Е. И., Свиридов Д. А., Ганин М. Ю. и др. Использование метода изотопной масс-спектрометрии для определения наличия экзогенных сахаров в меде. Пищевая промышленность. 2023. Т. 12. С. 105–113. [Oganesyants LA, Panasyuk AL, Kuzmina EI, Sviridov DA, Ganin MYu, *et al*. Using the isotope mass spectrometry method to detect the presence of exogenous sugars in honey. Food industry. 2023;12:105–113. (In Russ.)] https://doi.org/10.52653/PPI.2023.12.12.021.

19. Zhou X, Taylor MP, Salouros H, Prasad S. Authenticity and geographic origin of global honeys determined using carbon isotope ratios and trace elements. Scientific Reports. 2018;8(1):14639. https://doi.org/10.1038/s41598-018-32764-w

20. Stocker A, Rossmann A, Kettrup A, Bengsch E. Detection of royal jelly adulteration using carbon and nitrogen stable isotope ratio analysis. Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2006;20(2):181–184. https://doi.org/10.1002/rcm.2287

21. Kropf U, Golob T, Nečemer M, Kump P, Korošec M, *et al*. Carbon and nitrogen natural stable isotopes in slovene honey: Adulteration and botanical and geographical aspects. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2010;58(24):12794–12803. https://doi.org/10.1021/jf102940s

22. Oganesyants LA, Panasyuk AL, Kuzmina EI, Kharlamova LN. Determination of the carbon isotope $^{13}C/^{12}C$ in ethanol of fruit wines in order to define indentification characterictics. Foods and Raw Materials. 2016;4(1):141–147. https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-1-141-147

23. Оганесянц Л. А., Панасюк А. Л., Кузьмина Е. И., Свиридов Д. А., Ганин М. Ю. и др. Идентификация традиционных сидров и пуаре методом изотопной масс-спектрометрии. Пищевая промышленность. 2021. № 4. С. 55–57. [Oganesyants LA, Panasyuk AL, Kuzmina EI, Sviridov DA, Ganin MYu, *et al.* Traditional siders and perry identification by isotope mass spectrometry. Food industry. 2021;(4):55–57. (In Russ.)] https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-4-0036

24. Оганесянц Л. А., Панасюк А. Л., Кузьмина Е. И., Ганин М. Ю., Исследование отношений изотопов углерода, кислорода и водорода этанола фруктовых вин. Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 4. С. 717–725. [Oganesyants LA, Panasyuk AL, Kuzmina EI, Ganin MYu. Isotopes of carbon, oxygen, and hydrogen ethanol in fruit wines. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(4):717–725. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-717-725

25. Кузьмина Е. И., Егорова О. С., Акбулатова Д. Р., Свиридов Д. А., Ганин М. Ю. и др. Новые виды сахаросодержащего сырья для производства пищевой продукции. Пищевые системы. 2022. Т. 5. № 2. С. 145–156. [Kuzmina EI, Egorova OS, Akbulatova DR, Sviridov DA, Ganin MYu, *et al*. New types of sugar-containing raw materials for food production. Food systems. 2022;5(2):145–156. (In Russ.)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-145-156

26. Izol E, Kaya E, Karahan D. Investigation of some metals in honey samples produced in different regions of Bingöl Province by ICP-MS. Mellifera. 2021;21(1):1–17.

27. Свиридов Д. А., Ганин М. Ю., Шилкин А. А., Ильин А. А. Особенности элементного профиля меда различного ботанического происхождения. Пищевая промышленность. 2024. № 10. С. 77–80. [Sviridov DA, Ganin MYu, Shilkin AA, Il'in AA. Features of the elemental profile of honey of various botanic origins. Food industry. 2024;(10):77–80. (In Russ.)] https://doi.org/10.52653/PPI.2024.10.10.015

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Оганесянц Лев Арсенович / Lev A. Oganesyants ORCID 0000-0001-8195-4292
Панасюк Александр Львович / Alexander L. Panasyuk ORCID 0000-0002-5502-7951; eLIBRARY SPIN 4749-5602
Свиридов Дмитрий Александрович / Dmitriy A. Sviridov ORCID 0000-0002-5595-0455; eLIBRARY SPIN 6193-3420
Ганин Михаил Юрьевич / Mikhail Yu. Ganin ORCID 0000-0003-0518-1181; eLIBRARY SPIN 5203-0644

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2604
https://elibrary.ru/UNUDAG

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Влияние засоления на состав вторичных метаболитов и антиоксидантную активность экстрактов каллусных культур *Hyssopus officinalis* L.

Е. А. Попова

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

Поступила в редакцию: 18.03.2025
Принята после рецензирования: 06.05.2025
Принята к публикации: 05.08.2025

e-mail: elena_popova97@mail.ru
© Е. А. Попова, 2025

Аннотация.
Рост интереса к поиску новых источников биологически активных веществ делает каллусные культуры лекарственных растений перспективными в области биотехнологий. Особенно востребованными являются каллусные культуры иссопа лекарственного (*Hyssopus officinalis* L.) благодаря его уникальному химическому составу и свойствам. Важной задачей остается изучение факторов, помогающих повысить синтез необходимых соединений в каллусных культурах. Цель исследования – оценка влияния засоления на рост, содержание фенольных веществ и антиоксидантный потенциал каллусных культур *H. officinalis*.
В качестве объектов исследования выступали каллусные культуры иссопа лекарственного (*H. officinalis*), культивируемые на трех вариантах среды Мурасиге–Скуга. Содержание фенольных соединений и гидроксикоричных кислот определяли по стандартным методикам. Антиоксидантную активность определяли спектрофотометрическим методом путем анализа активности поглощения радикалов, восстанавливающей способности и хелатной активности.
Установлено подавление роста каллусных культур *H. officinalis* при добавлении высоких концентраций (200–500 мМ) хлорида натрия. Кроме того, эксперимент показал влияние солености питательной среды на количество фенольных соединений в каллусной культуре на среде МС-2. Так, при увеличении солености питательной среды выявлено понижение количества фенольных соединений. При добавлении в питательные среды МС-5 и МС-6 50 и 100 мМ хлорида натрия получен результат, свидетельствующий о наибольшем увеличении фенольных соединений в каллусной культуре. При анализе общего содержания гидроксикоричных кислот, полученных на основании эксперимента с тремя каллусными культурами, зафиксировано достоверное уменьшение их количества при разных концентрациях хлорида натрия. Присутствие в питательной среде различных концентраций соли приводило к понижению антиоксидантной активности экстрактов каллусной культуры по сравнению с контролем.
Полученные в ходе исследования результаты показали, что применение солевого стресса для усиления накопления фенольных соединений, гидроксикоричных кислот и повышения антиоксидантной активности экстрактов каллусных культур *H. officinalis* неэффективно.

Ключевые слова. Лекарственное растение, каллус, засоление, фенольные соединения, гидроксикоричные кислоты, антиоксидантная активность

Для цитирования: Попова Е. А. Влияние засоления на состав вторичных метаболитов и антиоксидантную активность экстрактов каллусных культур *Hyssopus officinalis* L. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 767–777. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2604

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2604
https://elibrary.ru/UNUDAG

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

Effect of Salinity on Secondary Metabolites and Antioxidant Activity in Callus Extracts of *Hyssopus officinalis* L.

Elena A. Popova

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Received: 18.03.2025
Revised: 06.05.2025
Accepted: 05.08.2025

e-mail: elena_popova97@mail.ru
© E.A. Popova, 2025

Abstract.
Callus cultures of medicinal plants have good prospects for biotechnology as sources of bioactive compounds. Hyssop callus cultures (*Hyssopus officinalis* L.) possess unique chemical composition and properties. To study the factors that enhance the synthesis of bioactive compounds, the author assessed the effect of salinity on the growth, phenolic content, and antioxidant potential in *H. officinalis* callus cultures.

While the content of phenolic compounds and hydroxycinnamic acids was determined using standard methods, the radical absorption activity, reducing capacity, and chelating activity made it possible to measure the antioxidant activity of the callus cultures.

High concentrations (200–500 mM) of NaCl suppressed the callus culture growth. The growth agents included three variants: MS-2 (2 mg/L kinetin, 3 mg/L 1-naphthaleneacetic acid), MS-5 (0.8 mg/L 6-benzylaminopurine, 1.5 mg/L 3-indoleacetic acid), and MS-6 (0.2 mg/L 6-benzylaminopurine and 1 mg/L 2,4-dichlorophenoxyacetic acid). The nutrient medium salinity affected the yield of phenolic compounds in the MS-2 callus culture. As the nutrient medium salinity increased, the amount of phenolic compounds went down. Adding 50 and 100 mM NaCl to MS-5 and MS-6 nutrient media boosted the content of phenolic compounds in the callus culture. The total content of hydroxycinnamic acids pointed at a significant decrease in their amount at different NaCl concentrations. Various salt concentrations in the nutrient medium inhibited the antioxidant activity of the callus culture extracts.

In this research, salt stress failed to increase the accumulation of phenolic compounds and hydroxycinnamic acids in *H. officinalis*. callus culture extracts. It also proved ineffective as antioxidant activity catalyst.

Keywords. Medicinal herb, callus, salinity, phenolic substances, hydroxycinnamic acids, antioxidant activity

For citation: Popova EA. Effect of Salinity on Secondary Metabolites and Antioxidant Activity in Callus Extracts of *Hyssopus officinalis* L. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):767–777. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2604

Введение

В современном мире каллусные культуры играют значительную роль в современной науке и промышленности благодаря перспективности их использования для получения ценных продуктов [1]. Одним из преимуществ каллусных культур является их способность к быстрому размножению и росту. Эта особенность позволяет эффективно масштабировать производство, обеспечивая значительные объемы биомассы для использования в различных отраслях промышленности [2].

Кроме того, каллусные культуры представляют интерес для биотехнологической индустрии, т. к. служат основой создания суспензионных культур – клеточных линий, культивируемых в жидкой питательной среде. Такой переход от каллуса к суспензии позволяет масштабировать производство вторичных метаболитов: суспензионные культуры можно выращивать на орбитальных шейкерах (лабораторный уровень) или промышленных биореакторах с регулируемыми параметрами (температура, pH, аэрация). Это обеспечивает стандартизацию условий, повышает выход биомассы и гарантирует стабильное качество целевых соединений [3].

Каллусные культуры – это перспективные источники для получения полезных продуктов. Они находят широкое применение в фармацевтической промышленности для производства биологически активных соединений; в пищевой промышленности – для создания новых ингредиентов и добавок; в сельском хозяйстве – для разработки устойчивых сортов растений; в косметической промышленности – для создания инновационных продуктов по уходу за кожей и волосами [1–3].

Существует достаточно большое количество исследований о получении биологически активных веществ из каллусных культур лекарственных растений, которые могут быть использованы для лечения рака, сердечно-сосудистых, нейродегенеративных и инфекционных заболеваний [2, 3]. Это такие вещества, как олеаноловая

кислота из *Calendula officialis* [4], кверцентин из *Chrysanthemum cinerariefolium* [5], розмариновая кислота из *Ocimum basilicum* [6] и *Coleus blumei* [7], паклитаксел из *Taxus baccata* [8], *Taxus chinensis* [9, 10] и др.

Большое внимание уделяется исследованиям повышения биосинтетической активности каллусных культур. Вторичные метаболиты в растениях вырабатываются в ответ на биотический или абиотический стресс [2]. В том числе в некоторых случаях к повышению биосинтеза вторичных метаболитов *in vitro* приводит солевой стресс. Устойчивые к соли растения содержат больше полифенольных веществ, чем те, которые не переносят засоление [11]. Например, Soheilikhah *et al*. [12] установили, что у *Hyssopus officinalis* L. при воздействии соли увеличивалось количество сапонинов, фенольных соединений, флавоноидов, антоцианов, а также антиоксидантная активность. Таким образом, данное растение можно причислить к солеустойчивым.

Согласно исследованиям химического состава, его составляющие имеют ряд полезных свойств [13–15]. Ввиду этого *H. officinalis* является важным растением, которое можно использовать для извлечения нужных веществ, применяемых в разных отраслях промышленности [16].

Цель исследования – оценка влияния засоления на рост, содержание фенольных веществ и антиоксидантный потенциал каллусных культур *H. officinalis*.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования выступали каллусные культуры иссопа лекарственного (*Hyssopus officinalis* L.).

Для проведения исследования использовали каллусные культуры *H. officinalis*, культивируемые на трех вариантах среды Мурасиге–Скуга (МС) [17]. Изменение среды проводили путем использования различных регуляторов роста: МС-2, в которой содержались 2 мг/л кинетина (КИН) и 3 мг/л 1-нафталинуксусной кислоты (НУК); МС-5 включала 0,8 мг/л 6-бензиламинопурина (БАП) в сочетании с 1,5 мг/л 3-индолилуксусной кислоты (ИУК); МС-6 – 0,2 мг/л БАП и 1 мг/л 2,4- дихлорфеноксиуксусная кислота (2,4-Д). В каждый из вариантов среды добавляли NaCl в концентрациях 0, 50, 100, 200, 300, 400 и 500 мМ. Затем каллусные культуры помещали в термостат (BINDER, Германия) для дальнейшего культивирования.

При проведении экспериментов с целью выявления влияния засоления на количественный химический состав и антиоксидантную активность экстрактов [18] применялся спектрофотометрический метод при помощи планшетного ридера CLARIOstar Plus (BMG Labtech, Германия).

Проведение реакции Фолина–Чокальтеу [19] позволило определить количество фенольных веществ. Для этого использовали стандартную кривую галловой кислоты (ГК) и выражали содержание фенолов в мг эквивалентов ГК на г/сухой массы каллуса (мг-экв. ГК/г СМ). Реакция Фолина–Чокальтеу проводилась в следующем порядке: 20 мкл экстракта вносили в ячейку микропланшета и смешивали со 100 мкл реактива, выдерживали 4 мин и добавляли 75 мкл 7,5 % раствора карбоната натрия, 30 мин выдерживали в темноте при комнатной температуре и измеряли оптическую плотность при 765 нм.

Чтобы количественно определить гидроксикоричные кислоты, использовали стандартную кривую розмариновой кислоты (РК) и выражали в мг эквивалентов РК на г/сухой массы каллуса (мг-экв. РК/г СМ). Реакцию проводили в следующем порядке: в ячейку микропланшета вносили 40 мкл 0,5 М HCl, 40 мкл реактива Арно, 40 мкл NaOH и 60 мкл дистиллированной воды, к каждому экстракту готовили раствор сравнения, не содержащий реактив Арно, и регистрировали оптическое поглощение при длине волны 525 нм [20].

Изучая антиоксидантную активность экстрактов, использовали три различных химических метода: по способности поглощать радикалы 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (DPPH) и 2,2′-азино-бис (3-этилбензтиазолин-6-сульфоновая кислота) (ABTS), а также по восстановительной способности при взаимодействии с комплексом Fe(III) – 2,4,6-трипиридил-s-триазин (FRAP) [21, 22]. Антиоксидантную активность выражали в мг эквивалентов аскорбиновой кислоты на г/сухой массы каллуса (мг-экв. АК/г СМ).

Результаты исследования обрабатывались с использованием программных обеспечений IBM SPSS Statistics 23 и OriginPro 2021. Экспериментальные данные проанализировали с использованием параметрического однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Достоверность различий между средними оценивали с помощью апостериорного критерия Тьюки ($p = 0{,}05$). Результаты представлены в форме графиков, на которых разными буквами обозначены статистически значимые различия. Коэффициент корреляции Пирсона применялся для исследования статистической взаимосвязи параметров. На основе результатов корреляционного анализа построены матрицы корреляций.

Результаты и их обсуждение

Солевой стресс является абиотическим стрессом, который негативно влияет на рост и развитие растений, но в то же время может привести к увеличению синтеза вторичных метаболитов [23].

С целью изучения влияния солевого стресса на рост каллусных культур *Hyssopus officinalis* L. оценивался прирост свежей и сухой массы (СМ), в результате чего установлено, что высокие концентрации соли в питательной среде приводят к снижению биомассы.

Предельное увеличение свежей массы каллусной культуры *H. officinalis* на среде МС-2 наблюдалось при отсутствии соли (3,79 ± 4,96 г) и при концентрациях 50 (4,04 ± 0,58 г) и 100 (3,78 ± 0,58 г) мМ NaCl в питательной среде (рис. 1а).

Также наибольший прирост свежей массы (2,69 ± 0,20 г) без присутствия NaCl показала каллусная культура на среде МС-5 (рис. 1b). При добавлении NaCl в концентрациях от 100 до 500 мМ этот показатель снижался в 2 раза. Наибольшая свежая масса каллусной культуры *H. officinalis*, культивируемой на среде МС-6, зафиксирована при отсутствии соли (2,69 ± 0,20 г) и при концентрациях 50 (1,18 ± 0,29 г) и 100 (1,24 ± 0,20 г) мМ NaCl в питательной среде (рис. 1c).

Наибольшая сухая масса каллусной культуры на среде МС-2 также зафиксирована при отсутствии соли (1,09 ± 0,04 г) и при концентрациях 50 (0,86 ± 0,86 г) и 100 (0,90 ± 0,06 г) мМ NaCl в питательной среде (рис. 2a). При концентрациях от 200 до 500 мМ NaCl наблюдалось значительное подавление роста каллусной культуры. Уровень прироста сырой биомассы уменьшился более чем в 3 раза, а прирост сухой биомассы – более чем в 10 раз.

Максимальная сухая масса каллусной культуры на среде МС-5 также достигнута без NaCl и составила 0,09 ± 0,02 г (рис. 2b). При добавлении NaCl в концентрациях от 200 до 500 мМ зафиксировано значительное подавление прироста СМ в среднем в 8 раз.

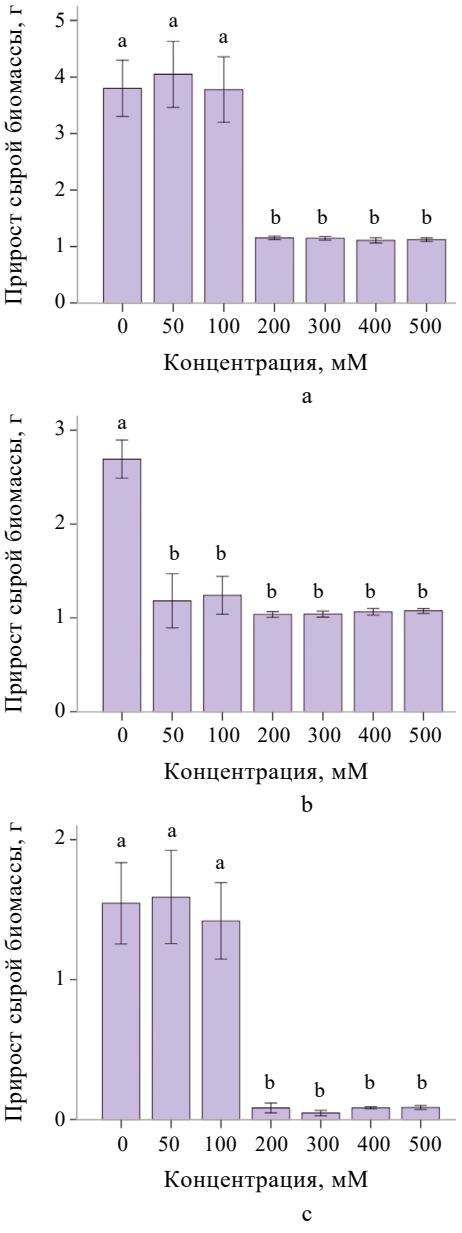
Наибольшая сухая масса данной каллусной культуры на среде МС-6 также зафиксирована при отсутствии соли (0,09 ± 0,02 г) и при концентрациях 50 (0,05 ± 0,02 г) и 100 (0,04 ± 0,01 г) мМ NaCl в питательной среде (рис. 2c). В то же время при концентрациях от 200 до 500 мМ NaCl наблюдалось значительное подавление роста каллусной культуры. Уровень прироста сырой биомассы уменьшился в среднем в 4 раза, а прирост сухой биомассы – в среднем в 19 раз.

Исследование влияния солевого стресса на рост растений семейства Lamiaceae показывает, что умеренные уровни солености не приводят к значительному снижению биомассы [24–26]. Например, в исследовании Taarit *et al.* [25] по влиянию засоления на рост *Lavandula multifida* установили, что с концентрацией NaCl до 60 мМ не наблюдалось значительного снижения биомассы. Однако при повышении концентрации NaCl наблюдалось угнетение роста, что подтверждает исследование по оценке влияния засоления на каллусную культуру *Rosmarinus officinalis* L. Youssef и Rady [27] зафиксировали, что присутствие 1,5 % NaCl в питательной среде приводило к снижению роста каллуса на 19,34 % в перерасчете на сырой вес.

В настоящем исследовании также видно, что высокие концентрации NaCl оказывают подавляющее действие на прирост сырой и сухой биомассы каллусных культур *H. officinalis*.

Фенольные соединения являются распространенными веществами, которые содержатся в большинстве тканей растений [28]. Они являются вторичными метаболитами и обладают многочисленными биологически активными свойствами [20].

Оценивая результаты влияния солевого стресса на количество фенольных веществ в каллусной культуре на среде МС-2, мы можем увидеть, что при отсутствии NaCl (0 мМ) наблюдается их максимальный уровень (8,73 ± 0,75 мг-экв. ГК/г СМ) (рис. 3a). По мере увеличения солености происходило уменьшение фенольных веществ в каллусе. Концентра-



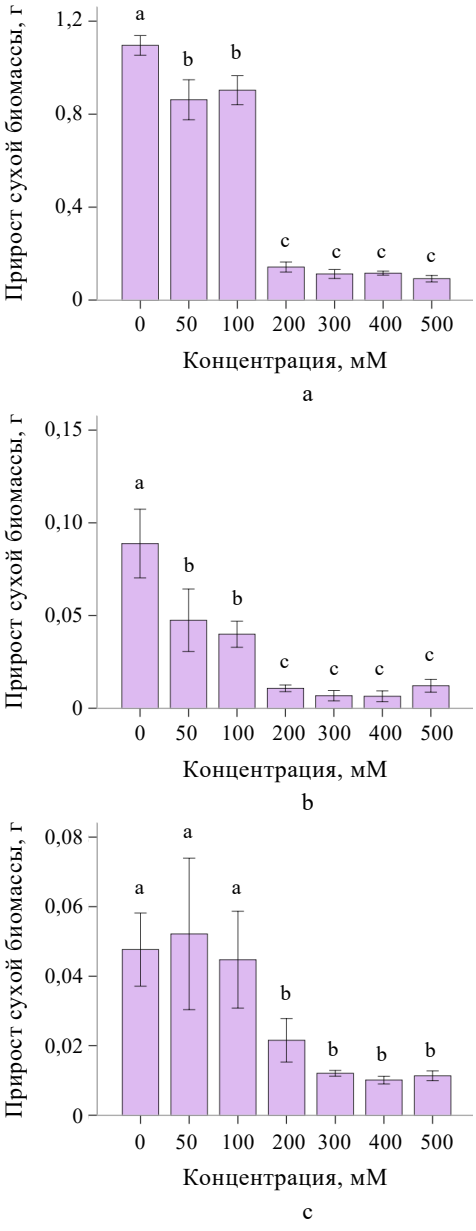
Разные буквенные индексы указывают на статистически значимые различия (ANOVA, тест Тьюки, $p \leq 0,05$)

Рисунок 1. Результаты изменения свежей массы исследуемого каллуса при различных концентрациях соли в питательных средах: a – МС-2; b – МС-5; c – МС-6

Figure 1. Fresh mass of *Hyssopus officinalis* callus at different salt concentrations in nutrient media: a – MS-2 (2 mg/L kinetin, 3 mg/L 1-naphthaleneacetic acid); b – MS-5 (0.8 mg/L 6-benzylaminopurine, 1.5 mg/L 3-indoleacetic acid); and c – MS-6 (0.2 mg/L 6-benzylaminopurine and 1 mg/L 2,4-dichlorophenoxyacetic acid)

ции 300, 400 и 500 мМ соли в питательной среде показали разницу по сравнению с контрольным вариантом более чем в 4 раза.

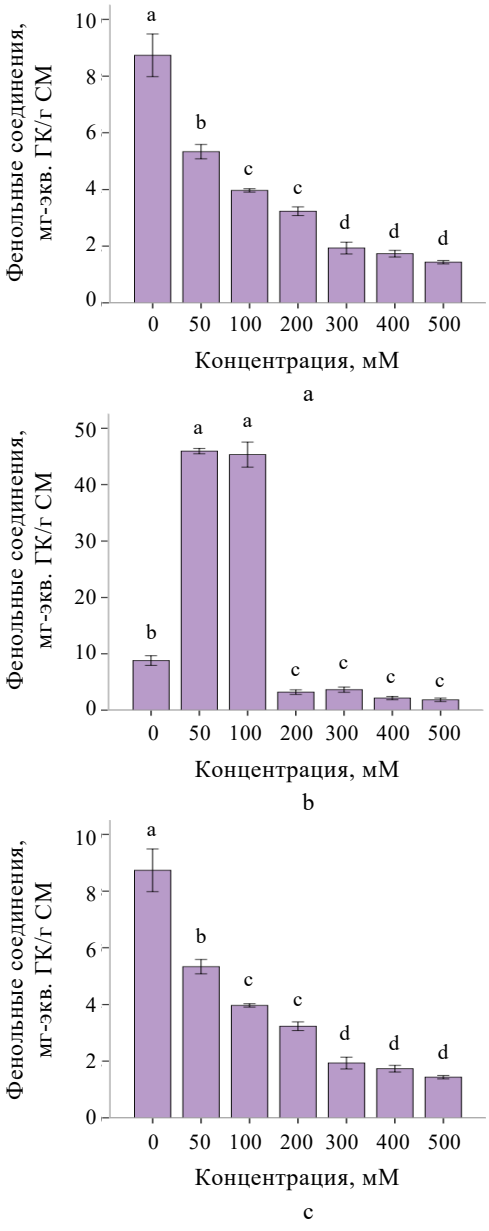
Несколько иная зависимость наблюдалась для каллуса, выращенного на среде МС-5. Так, содержание фенольных соединений в контроле составило 8,80 ± 0,85 мг-экв. ГК/г СМ, что в 5 раз меньше, чем при добавлении 50 (45,97 ± 0,47 мг-экв. ГК/г СМ) и 100 (55,33 ± 2,21 мг-экв. ГК/г СМ) мМ NaCl в питательную среду (рис. 3b). При уровнях солености 200–500 мМ среды



Разные буквенные индексы указывают на статистически значимые различия (ANOVA, тест Тьюки, $p \leq 0,05$)

Рисунок 2. Результаты изменения сухой массы исследуемого каллуса при различных концентрациях соли в питательных средах: a – МС-2; b – МС-5; c – МС-6

Figure 2. Dry mass of *Hyssopus officinalis* callus at different salt concentrations in nutrient media: a – MS-2 (2 mg/L kinetin, 3 mg/L 1-naphthaleneacetic acid); b – MS-5 (0.8 mg/L 6-benzylaminopurine, 1.5 mg/L 3-indoleacetic acid); and c – MS-6 (0.2 mg/L 6-benzylaminopurine and 1 mg/L 2,4-dichlorophenoxyacetic acid)



Разные буквенные индексы указывают на статистически значимые различия (ANOVA, тест Тьюки, $p \leq 0,05$)

Рисунок 3. Результаты оценки содержания фенольных веществ в исследуемых каллусах при различных концентрациях соли в питательных средах: a – МС-2; b – МС-5; c – МС-6

Figure 3. Total phenolics in *Hyssopus officinalis* callus at different salt concentrations in nutrient media: a – MS-2 (2 mg/L kinetin, 3 mg/L 1-naphthaleneacetic acid); b – MS-5 (0.8 mg/L 6-benzylaminopurine, 1.5 mg/L 3-indoleacetic acid); and c – MS-6 (0.2 mg/L 6-benzylaminopurine and 1 mg/L 2,4-dichlorophenoxyacetic acid)

для культивирования данной каллусной культуры количество фенольных соединений снизилось в среднем в 3 раза.

В каллусной культуре, которая культивировалась на среде МС-6, наблюдалось незначительное увеличение количества фенольных соединений при концентрации 50 (5,47 ± 0,11 мг-экв. ГК/г СМ) и 100 (5,63 ± 0,25 мг-экв. ГК/г СМ) мМ соли в питательной среде в сравнении с контрольной группой (4,87 ± 0,21 мг-экв. ГК/г СМ) (рис. 3c).

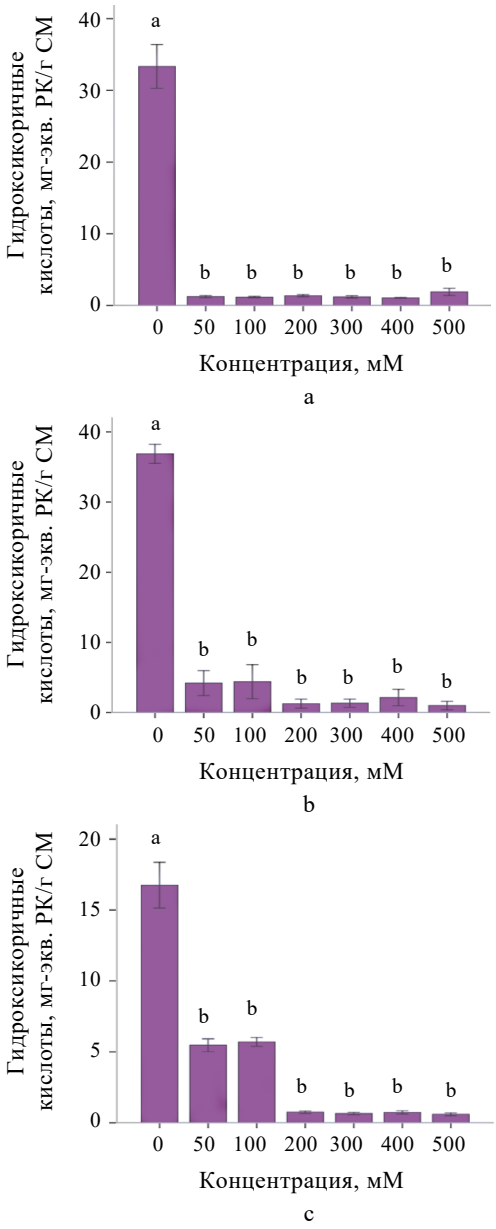
По итогам анализа результатов влияния солевого стресса на количество гидроксикоричных кислот в каллусной культуре на среде МС-2 можно увидеть, что в контрольной группе наблюдался их максимальный уровень (33,33 ± 3,05 мг-экв. РК/г СМ) (рис. 4a). Таким образом, при условии засоления (концентрация NaCl от 50 до 500 мМ по сравнению с контролем) количество гидроксикоричных кислот было значительно ниже.

Высокий уровень гидроксикоричных кислот в каллусной культуре на среде МС-5 установлен в контроле (33,50 ± 3,22 мг-экв. РК/г СМ) (рис. 4b). Снижение количества гидроксикоричных кислот в 3 раза отмечено при концентрациях 50 (10,93 ± 0,90 мг-экв. РК/г СМ) и 100 (11,40 ± 0,61 мг-экв. РК/г СМ) мМ NaCl в питательной среде. Присутствие более высоких концентрации NaCl (200–500 мМ) в питательной среде значительно уменьшало уровень гидроксикоричных кислот в каллусной культуре до минимума (1,20 ± 0,20 мг-экв. РК/г СМ) при концентрации 500 мМ.

Для каллусной культуры, выращенной на среде МС-6, наибольшее общее содержание гидроксикоричных кислот зафиксировано в контрольной группе (18,43 ± 0,68 мг-экв. РК/г СМ) (рис. 4c). Следовательно, при условии засоления (концентрация NaCl от 50 до 500 мМ по сравнению с контролем) количество гидроксикоричных кислот значительно ниже.

Согласно ряду исследований, умеренный солевой стресс стимулирует синтез фенольных соединений в растениях семейства Lamiaceae [29–31]. Например, Valifard *et al*. [29] зафиксировали, что общее содержание фенольных соединений растения *Salvia mirzayanii* повысилось при умеренной концентрации NaCl, равной 50 мМ. Однако в исследовании по влиянию солевого стресса на вторичные метаболиты растений *H. officinalis* установили увеличение фенольных соединений в листьях и корнях [12]. Наибольшее содержание фенольных соединений зафиксировали при концентрации 200 мМ NaCl. Но согласно данным исследования, высокие концентрации соли уменьшают количественное содержание фенольных веществ и гидроксикоричных кислот в каллусных культурах *H. officinalis*.

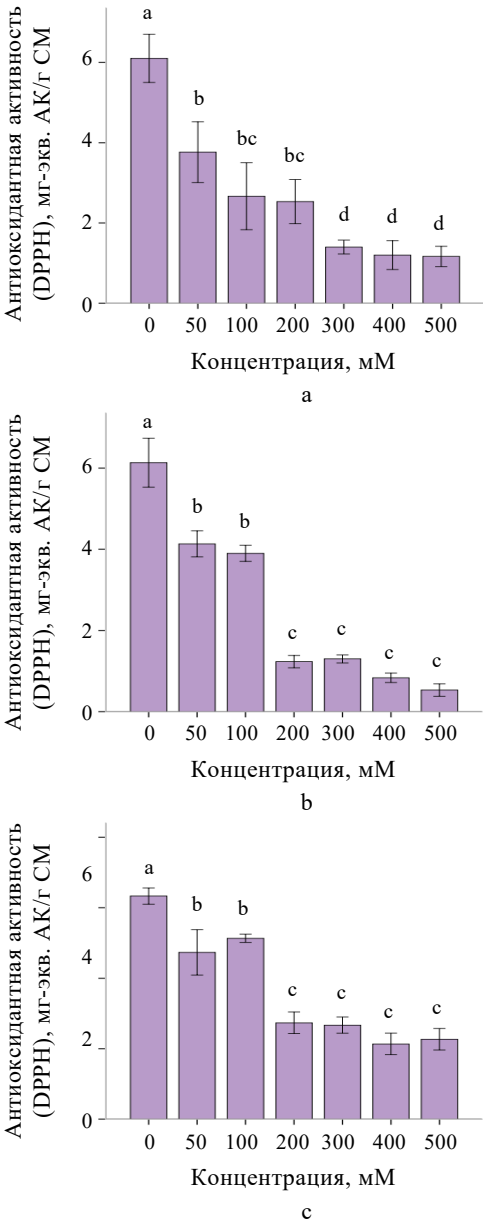
Анализ антиоксидантной активности экстрактов каллусной культуры, культивируемой на среде МС-2, показал максимальную активность в контрольной группе с использованием аскорбиновой кислоты (АК), которая составила 6,10 ± 0,60 мг-экв. АК/г СМ, согласно методу DPPH (рис. 5a), FRAP (рис. 6a) – 44,30 ± 4,00 мг-экв. АК/г СМ и 4,83 ± 0,45 мг-экв. соответственно. АК/г СМ по методу ABTS (рис. 7a). Добавление в питательную среду разных концентраций NaCl приводило к уменьшению антиоксидантной способности экстракта данной каллусной культуры.



Разные буквенные индексы указывают на статистически значимые различия (ANOVA, тест Тьюки, $p \leq 0,05$)

Рисунок 4. Результаты оценки содержания гидроксикоричных кислот в исследуемых каллусах при различных концентрациях соли в питательных средах: a – МС-2; b – МС-5; c – МС-6

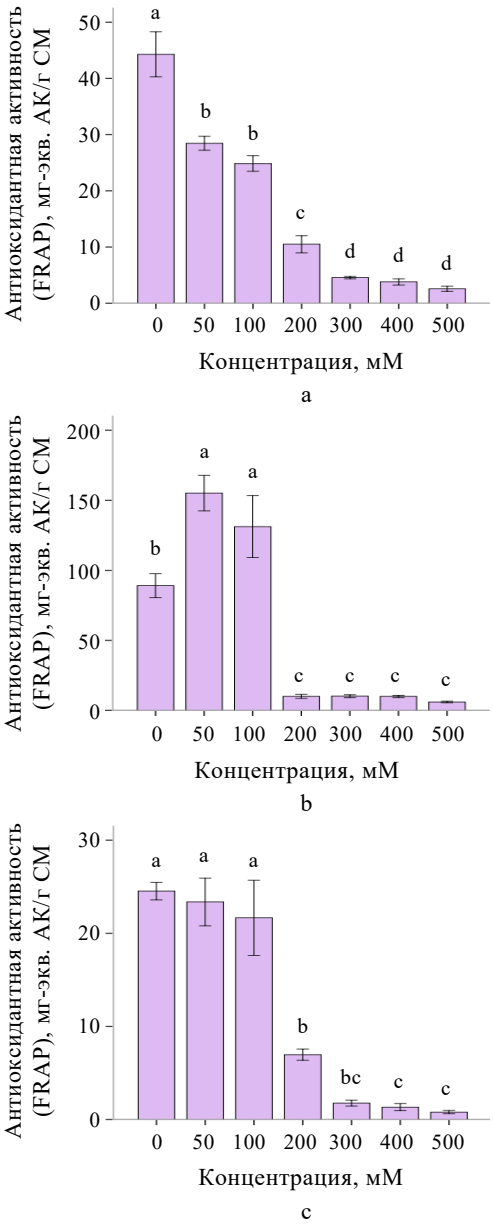
Figure 4. Hydroxycinnamic acids in *Hyssopus officinalis* callus at different salt concentrations in nutrient media: a – MS-2 (2 mg/L kinetin, 3 mg/L 1-naphthaleneacetic acid); b – MS-5 (0.8 mg/L 6-benzylaminopurine, 1.5 mg/L 3-indoleacetic acid); and c – MS-6 (0.2 mg/L 6-benzylaminopurine and 1 mg/L 2,4-dichlorophenoxyacetic acid)



Разные буквенные индексы указывают на статистически значимые различия (ANOVA, тест Тьюки, $p \leq 0,05$)

Рисунок 5. Результаты активности по удалению свободных радикалов DPPH исследуемых экстрактов каллусов при различных концентрациях соли в питательных средах: a – MC-2; b – MC-5; c – MC-6

Figure 5. DPPH free radical scavenging in *Hyssopus officinalis* callus extracts at different salt concentrations in nutrient media: a – MS-2 (2 mg/L kinetin, 3 mg/L 1-naphthaleneacetic acid); b – MS-5 (0.8 mg/L 6-benzylaminopurine, 1.5 mg/L 3-indoleacetic acid); and c – MS-6 (0.2 mg/L 6-benzylaminopurine and 1 mg/L 2,4-dichlorophenoxyacetic acid)



Разные буквенные индексы указывают на статистически значимые различия (ANOVA, тест Тьюки, $p \leq 0,05$)

Рисунок 6. Результаты железо восстанавливающей активности (FRAP) экстрактов исследуемых каллусов при различных концентрациях соли в питательных средах: a – MC-2; b – MC-5; c – MC-6

Figure 6. Iron reducing activity (FRAP) in Hyssopus officinalis callus extracts at different salt concentrations in nutrient media: a – MS-2 (2 mg/L kinetin, 3 mg/L 1-naphthaleneacetic acid); b – MS-5 (0.8 mg/L 6-benzylaminopurine, 1.5 mg/L 3-indoleacetic acid); and c – MS-6 (0.2 mg/L 6-benzylaminopurine and 1 mg/L 2,4-dichlorophenoxyacetic acid)

Для экстракта каллусной культуры, выращенной на среде MC-5, наибольшая антиоксидантная активность по результатам DPPH-теста наблюдалась без добавления NaCl (6,13 ± 0,60 мг-экв. АК/г СМ) (рис. 5b). Наибольшая восстановительная способность экстракта данной каллусной культуры, согласно тесту FRAP (рис. 6b), зафиксирована при концентрациях 50 (155,13 ± 12,74 мг-экв. АК/г СМ) и 100 (131,20 ± 22,17 мг-экв. АК/г СМ) мМ NaCl. Определение антиоксидантной активности методом ABTS не показало статистически

значимых различий активности экстракта каллусной культуры в контроле (4,83 ± 0,50 мг-экв. АК/г СМ) и при добавлении 50 (3,93 ± 0,64 мг-экв. АК/г СМ) мМ NaCl (рис. 7b).

Наибольшая антиоксидантная активность экстракта каллусной культуры, культивируемой на среде МС-6, согласно методам DPPH (3,17 ± 0,11 мг-экв. АК/г СМ) и ABTS (2,67 ± 0,11 мг-экв. АК/г СМ), зафиксирована в контроле (рис. 5c и 7c). В свою очередь антиоксидантная активность, определенная по методу FRAP, не различалась в контроле (24,53 ± 0,94 мг-экв. АК/г СМ) и при концентрациях 50 (23,37 ± 2,56 мг-экв. АК/г СМ) и 100 (21,67 ± 4,04 мг-экв. АК/г СМ) мМ NaCl (рис. 6c).

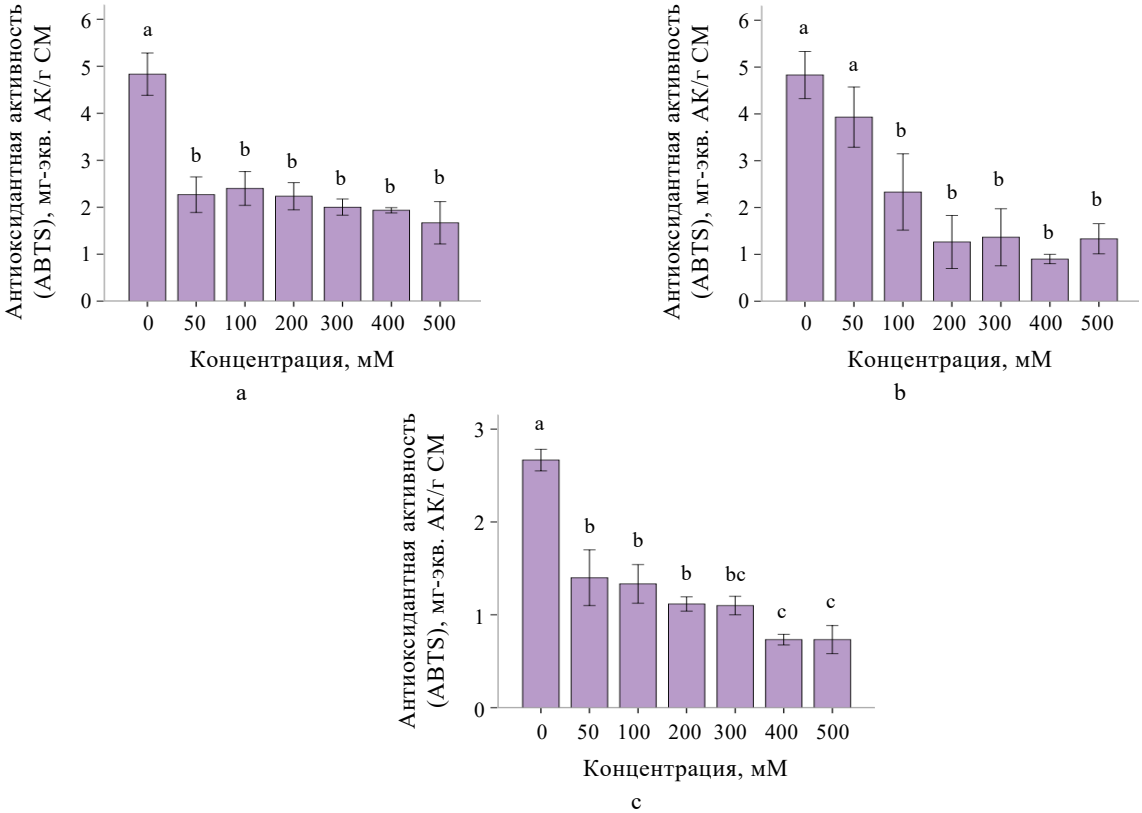
Корреляционный анализ выявил значимые корреляции между различными концентрациями NaCl в питательной среде и содержанием фенольных соединений, гидроксикоричных кислот, а также антиоксидантной активностью (DPPH, FRAP, ABTS) экстрактов исследуемых каллусных культур *H. officinalis*.

Результаты корреляционного анализа для исследуемых параметров каллусной культуры, культивируемой на среде МС-2, показали, что присутствие соли отрицательно влияло на содержание фенольных веществ ($r = –0,87$; $p \leq 0,01$), содержание гидроксикоричных кислот ($r = –0,51$; $p \leq 0,05$), а также антиоксидантную активность, определенную методами DPPH ($r = –0,83$; $p \leq 0,01$), FRAP ($r = –0,90$; $p \leq 0,01$) и ABTS ($r = –0,67$; $p \leq 0,01$) (рис. 8).

Такая же зависимость наблюдалась и для каллусной культуры, культивируемой на среде МС-5, а именно отрицательная связь наблюдалась между концентрациями соли в питательной среде и содержанием фенольных соединений ($r = –0,61$; $p \leq 0,01$), содержанием гидроксикоричных кислот ($r = –0,75$; $p \leq 0,01$), антиоксидантной активностью, согласно методам DPPH ($r = –0,90$; $p \leq 0,01$), FRAP ($r = –0,79$; $p \leq 0,01$) и ABTS ($r = –0,79$; $p \leq 0,01$) (рис. 9).

Присутствие соли в питательной среде МС-6 также отрицательно сказывалось на содержании фенольных соединений ($r = –0,93$; $p \leq 0,01$), содержании гидроксикоричных кислот ($r = –0,59$; $p \leq 0,05$), а также антиоксидантной активности, согласно методам DPPH ($r = –0,88$; $p \leq 0,01$), FRAP ($r = –0,92$; $p \leq 0,01$) и ABTS ($r = –0,79$; $p \leq 0,01$) экстрактов каллусной культуры (рис. 10).

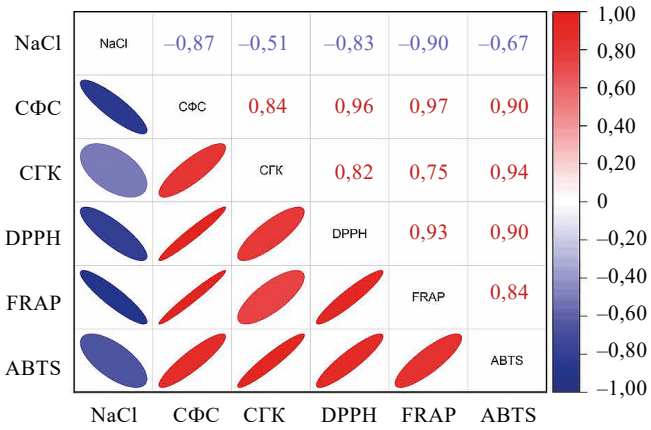
Полученные результаты о снижении антиоксидантной активности с увеличением концентрации



Разные буквенные индексы указывают на статистически значимые различия (ANOVA, тест Тьюки, $p \leq 0,05$)

Рисунок 7. Результаты активности по удалению радикалов ABTS исследуемых экстрактов каллусов при различных концентрациях соли в питательных средах: a – МС-2; b – МС-5; c – МС-6

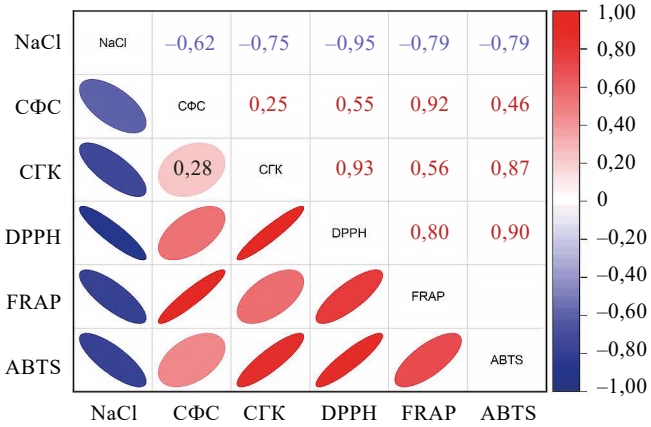
Figure 7. Removal of ABTS radicals in *Hyssopus officinalis* callus at different salt concentrations in nutrient media: a – MS-2 (2 mg/L kinetin, 3 mg/L 1-naphthaleneacetic acid); b – MS-5 (0.8 mg/L 6-benzylaminopurine, 1.5 mg/L 3-indoleacetic acid); and c – MS-6 (0.2 mg/L 6-benzylaminopurine and 1 mg/L 2,4-dichlorophenoxyacetic acid)



СФС – содержание фенольных соединений; СГК – содержание гидроксикоричных кислот; пустые кружки обозначают значимые корреляции ($p \leq 0,05$)

Рисунок 8. Корреляционная матрица для показателей каллусной культуры, культивируемой на среде МС-2

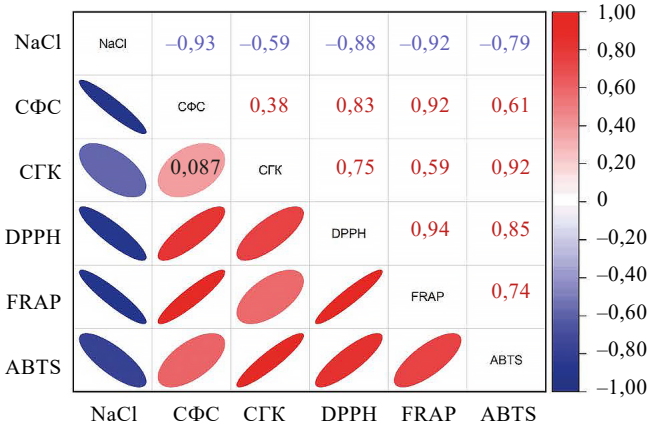
Figure 8. Correlation matrix for callus culture parameters cultivated on MS-2 medium (2 mg/L kinetin, 3 mg/L 1-naphthaleneacetic acid)



СФС – содержание фенольных соединений; СГК – содержание гидроксикоричных кислот; пустые кружки обозначают значимые корреляции ($p \leq 0,05$)

Рисунок 9. Корреляционная матрица для показателей каллусной культуры, культивируемой на среде МС-5

Figure 9. Correlation matrix for callus culture parameters cultivated on MS-5 medium (0.8 mg/L 6-benzylaminopurine, 1.5 mg/L 3-indoleacetic acid)



СФС – содержание фенольных соединений; СГК – содержание гидроксикоричных кислот; пустые кружки обозначают значимые корреляции ($p \leq 0,05$)

Рисунок 10. Корреляционная матрица для показателей каллусной культуры, культивируемой на среде МС-6

Figure 10. Correlation matrix for callus culture parameters cultivated on MS-6 (0.2 mg/L 6-benzylaminopurine, and 1 mg/L 2,4-dichlorophenoxyacetic acid)

NaCl противоречат многим данным, представляемым в [29, 32]. В том числе в исследовании [12] сообщалось, что при концентрации 200 мМ NaCl антиоксидантная активность растения *H. officinalis* повышалась в 2,9 раз.

Выводы

Высокие уровни соли негативно влияют на рост каллусных культур. Кроме того, в экстрактах каллусных культур *Hyssopus officinalis* L. зафиксировано снижение уровня фенольных веществ и гидроксикоричных кислот. Также увеличение концентрации NaCl в питательной среде приводило к уменьшению антиоксидантной активности исследуемых экстрактов.

Применение NaCl с целью усиления синтеза биологически активных веществ метаболитов каллусных культур *H. officinalis* не является эффективным методом. Полученные результаты подчеркивают важность проведения дальнейших исследований для определения оптимальных условий культивирования, которые могли бы способствовать созданию условия для увеличения содержания вторичных метаболитов в каллусных культурах *H. officinalis*.

Критерии авторства

Автор статьи полностью отвечает за концептуализацию исследования, методологию, проведение экспериментальных исследований, обработку результатов, подготовку и редактирование статьи.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

The author is fully responsible for the research concept, methodology, experimental results, processing, preparing, and proofreading.

Conflict of interest

The author state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Sidik NJ, Agha HM, Alkamil AA, Alsayadi MMS, Mohammed AA. A mini review of plant tissue culture: The role of media optimization, growth regulators in modern agriculture, callus induction and the applications. AUIQ Complementary Biological System. 2024;1(2):96–109. https://doi.org/10.70176/3007-973X.1019

2. Benjamin ED, Ishaku GA, Peingurta FA, Afolabi AS. Callus culture for the production of therapeutic compounds. American Journal of Plant Biology. 2019;4(4):76–84. https://doi.org/10.11648/j.ajpb.20190404.14

3. Efferth T. Biotechnology applications of plant callus cultures. Engineering. 2019;5(1):50–59. https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.006

4. Wiktorowska E, Długosz M, Janiszowska W. Significant enhancement of oleanolic acid accumulation by biotic elicitors in cell suspension cultures of *Calendula officinalis* L. Enzyme and Microbial Technology. 2010;46(1):14–20. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2009.09.002

5. Purwianingsih W, Febri S, Kusdianti K. Formation flavonoid secondary metabolites in callus culture of *Chrysanthemum cinerariefolium* as alternative provision medicine. AIP Conference Proceedings. 2016;1708. https://doi.org/10.1063/1.4941150

6. Bais HP, Walker TS, Schweizer HP, Vivanco JM. Root specific elicitation and antimicrobial activity of rosmarinic acid in hairy root cultures of *Ocimum basilicum*. Plant Physiology and Biochemistry. 2002;40(11):983–995. https://doi.org/10.1016/S0981-9428(02)01460-2

7. Szabo E, Thelen A, Petersen M. Fungal elicitor preparations and methyl jasmonate enhance rosmarinic acid accumulation in suspension cultures of *Coleus blumei*. Plant Cell Reports. 1999;18:485–489. https://doi.org/10.1007/s002990050608

8. Tabata H. Paclitaxel production by plant-cell-culture technology. Biomanufacturing. 2004;7:1–23. https://doi.org/10.1007/b13538

9. Wang C, Wu J, Mei X. Enhancement of taxol production and excretion in *Taxus chinensis* cell culture by fungal elicitation and medium renewal. Applied Microbiology and Biotechnology. 2001;55:404–410. https://doi.org/10.1007/s002530000567

10. Wang JW, Wu JY. Nitric oxide is involved in methyl jasmonate-induced defense responses and secondary metabolism activities of *Taxus* cells. Plant and Cell Physiology. 2005;46:(6):923–930. https://doi.org/10.1093/pcp/pci098

11. Assaf M, Korkmaz A, Karaman Ş, Kulak M. Effect of plant growth regulators and salt stress on secondary metabolite composition in Lamiaceae species. South African Journal of Botany. 2022;144:480–493. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.10.030

12. Soheilikhah Z, Karimi N, Modarresi M, Salehi-Lisar SY, Movafeghi A. Antioxidant defense and secondary metabolites concentration in hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) plants as affected by salt stress. Acta Agriculturae Slovenica. 2021;117(2):1–12. https://doi.org/10.14720/aas.2021.117.2.2065

13. Tahir M, Khushtar M, Fahad M, Rahman MA. Phytochemistry and pharmacological profile of traditionally used medicinal plant Hyssop (*Hyssopus officinalis* L.). Journal of Applied Pharmaceutical Science. 2018;8(7):132–140. https://doi.org/10.7324/JAPS.2018.8721

14. Zayova E, Geneva M, Stancheva I, Dimitrova L, Petrova M, *et al*. Evaluation of the antioxidant potential of *in vitro* propagated hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) with different plant growth regulators. Medicinal Plants-International Journal of Phytomedicines and Related Industries. 2018;10(4):295–304. http://dx.doi.org/10.5958/0975-6892.2018.00044.8

15. Mobaiyen H, Jafari-Sales A. Antibacterial effects of methanolic extracts of *Reum ribes* L. and *Hyssopus officinalis* on some standard pathogenic bacteria. Jorjani Biomedicine Journal. 2019;7(3):34–44. https://doi.org/10.29252/jorjanibiomedj.7.3.34

16. Sharifi-Rad J, Quispe C, Kumar M, Akram M, Amin M, *et al*. *Hyssopus* essential oil: An update of its phytochemistry, biological activities, and safety profile. Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2022;2022(1):8442734. https://doi.org/10.1155/2022/8442734

17. Murashige T, Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. Physiologia Plantarum. 1962;15(3):473–497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

18. Величкович Н. С., Степанова А. А., Люц В. А., Козлова О. В., Ларичев Т. А. Подбор параметров экстракции биоактивных веществ из лекарственных растений с применением молочной сыворотки. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 3. С. 633–644. [Velichkovich NS, Stepanova AA, Lutz VA, Kozlova OV, Larichev TA. Extraction of bioactive substances from medicinal plants with whey: Selecting optimal parameters. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(3):633–644. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2532

19. Padhi EM, Liu R, Hernandez M, Tsao R, Ramdath DD. Total polyphenol content, carotenoid, tocopherol and fatty acid composition of commonly consumed Canadian pulses and their contribution to antioxidant activity. Journal of Functional Foods. 2017;38(Part B):602–611. https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.11.006

20. Štefan MB, Vuković Rodríguez J, Blažeković B, Kindl M, Vladimir-Knežević S. Total hydroxycinnamic acids assay: Prevalidation and application on Lamiaceae species. Food Analytical Methods. 2014;7(2):326–336. https://doi.org/10.1007/s12161-013-9630-8

21. Feduraev P, Skrypnik L, Nebreeva S, Dzhobadze G, Vatagina A, *et al*. Variability of phenolic compound accumulation and antioxidant activity in wild plants of some *Rumex* species (*Polygonaceae*). Antioxidants. 2022;11(2):311. https://doi.org/10.3390/antiox11020311

22. Skrypnik L, Feduraev P, Golovin A, Maslennikov P, Belov N, *et al*. Biotechnological potential of different organs of mistletoe (*Viscum album* L.) collected from various host tree species in an urban area. Plants. 2022;11(20):2686. https://doi.org/10.3390/plants11202686

23. Razavizadeh R, Adabavazeh F, Komatsu S. Chitosan effects on the elevation of essential oils and antioxidant activity of *Carum copticum* L. seedlings and callus cultures under in vitro salt stress. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology. 2020;29:473–483. https://doi.org/10.1007/s13562-020-00560-1

24. García-Caparrós P, Llanderal A, Pestana M, Correia PJ, Lao MT. *Lavandula multifida* response to salinity: Growth, nutrient uptake, and physiological changes. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2017;180(1):96–104. https://doi.org/10.1002/jpln.201600062

25. Taarit MB, Msaada K, Hosni K, Hammami M, Kchouk ME, *et al*. Plant growth, essential oil yield and composition of sage (*Salvia officinalis* L.) fruits cultivated under salt stress conditions. Industrial Crops and Products. 2009;30(3):333–337. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.06.001

26. Musbah HM, Ibrahim KM, Rafah M. The potential of increasing poly phenols in *Coleus blumei in vivo* and *in vitro* using NaCl stress. Biochemical & Cellular Archives. 2018;1267–1273.

27. Youssef AA, Rady MR. Effect of salt stress on the essential oil content and composition of *Rosmarinus officinalis* callus cultures. Egyptian Journal of Horticulture. 2000;27(1):69–80.

28. de La Rosa LA, Moreno-Escamilla JO, Rodrigo-García J, Alvarez-Parrilla E. Phenolic compounds. In: Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables. Great Britain: Woodhead publishing; 2019. pp. 253–271. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00012-9

29. Valifard M, Mohsenzadeh S, Kholdebarin B, Rowshan V. Effects of salt stress on volatile compounds, total phenolic content and antioxidant activities of *Salvia mirzayanii*. South African Journal of Botany. 2014;93:92–97. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2014.04.002

30. Hawrylak-Nowak B, Dresler S, Stasińska-Jakubas M, Wójciak M, Sowa I, *et al*. NaCl-induced elicitation alters physiology and increases accumulation of phenolic compounds in *Melissa officinalis* L. International Journal of Molecular Sciences. 2021;22(13):6844. https://doi.org/10.3390/ijms22136844

31. Bistgani ZE, Hashemi M, DaCosta M, Craker L, Maggi F, *et al*. Effect of salinity stress on the physiological characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of *Thymus vulgaris* L. and *Thymus daenensis* Celak. Industrial Crops and Products. 2019;135:311–320. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.055

32. Lungoci C, Motrescu I, Filipov F, Jitareanu CD, Teliban GC, *et al*. The impact of salinity stress on antioxidant response and bioactive compounds of *Nepeta cataria* L. Agronomy. 2022;12(3):562. https://doi.org/10.3390/agronomy12030562

Дополнительная информация об авторе / Additional information about the author

Попова Елена Александровна / Elena A. Popova ORCID 0000-0001-7008-3823; eLIBRARY SPIN 9577-5085

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2609
https://elibrary.ru/QTYFGF

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Мясная продуктивность обыкновенной рыси (*Lynx lynx* Linnaeus, 1758) и пищевое качество получаемого мяса

В. В. Степанов[1], А. А. Сергеев[1,*], Е. А. Вечтомова[2], Б. Е. Зарубин[1], М. А. Перевозчикова[1,], А. В. Заушинцена[2]**

[1] *Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова, Киров, Россия*

[2] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

Поступила в редакцию: 24.03.2025
Принята после рецензирования: 19.10.2025
Принята к публикации: 04.11.2025

**e-mail: metalbird@mail.ru,*
***e-mail: mperevozchikova@mail.ru*

© В. В. Степанов, А. А. Сергеев, Е. А. Вечтомова, Б. Е. Зарубин, М. А. Перевозчикова, А. В. Заушинцена, 2025

Аннотация.
Рысь (*Lynx lynx* Linnaeus, 1758) является ценным охотничьим животным и перспективным объектом пушного звероводства. Цель исследования – изучить отдельные показатели мясной продукции обыкновенной рыси и возможности ее использования как промыслового животного на территории Кировской области.

Объекты исследования – морфометрические параметры и образцы проб мяса для физико-химического анализа 137 особей рыси, из них исследовано на трихинеллез – 90. Статистический анализ проводился с использованием программного обеспечения MS Excel и Statgraphics общепринятыми методами. Для описания выборок определяли среднее значение (M), ошибку среднего (m). Для проверки достоверности различий между двумя выборками использовали критерии Стьюдента, Фишера, метод множественного сравнения Ньюмена-Кейсла, а также непараметрические критерии Манна-Уитни. Нулевую гипотезу отклоняли на уровне значимости менее 0,05.

Рассмотрена возможность пищевого использования мяса рыси, которое, согласно приведенным исследованиям, обладает пищевой ценностью и отличается высокими вкусовыми качествами. На основании исследований по традиционным методикам материала от 137 рысей, добытых на территории Кировской области и сопредельных территорий, рассчитаны показатели мясной продуктивности мяса рыси, на основании которых произведена оценка стоимостных ресурсов данного вида продукции (500 руб/кг) и предполагаемый вклад в региональную экономику области при легализации добычи данного вида в качестве источника пищевой продукции (562,50 тыс. руб). Проводили сравнительный анализ мяса рыси и мяса сельскохозяйственных животных. По содержанию влаги (50,47 %) мясо рыси уступало мясу всех сельскохозяйственных животных, кроме свиней. По содержанию золы (5,60 %) мясо рыси в 4,6 раза превосходило крольчатину, а по содержанию белка (25,14 %) имело наивысшие показатели среди всех использованных в сравнении видов. Мясо рыси имело низкое содержание жира (1,81 %) и калорийность (116,86 ккал/100 г). В наибольшем количестве зола содержалась в мясе полуторогодовалых животных, а белок – животных текущего года рождения (сеголетков). Витамина А в мясе рыси в 4,0 раза меньше, чем в мясе нутрии, а витамина Е – в 8,7 раза больше. Витаминов B_2, B_3, B_4 больше в мясе сельскохозяйственных животных, а B_1, B_6, B_{12} – в мясе рыси.

Учитывая широкий ареал вида, различия в природных условиях, неоднородный состав объектов питания, региональные геохимические особенности в районах добычи, мясо рыси может иметь неоднородные характеристики и химический состав, на который также влияют пол, возраст, физиологическое и репродуктивное состояние, сезон и способы охоты. Изучена зараженность трихинеллезом мясной продукции, получаемой при убое рыси. Основным препятствием для потребления мяса рыси является высокая распространенность трихинеллеза в природных популяциях этого хищника. Полученные данные могут быть использованы при разработке и утверждении государственных стандартов на мясо рыси на территории России.

Ключевые слова. *Lynx lynx*, мясо рыси, мясная продуктивность, закупочная цена, химический состав, пищевая ценность, зараженность

Финансирование. Работы выполнены в 2024 г. во Всероссийском научно-исследовательском институте охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова (г. Киров) в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 гг.), утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2020 г. № 3684-р, составляющей основу Государственного задания института (тема «Совершенствование научных основ устойчивого использования, методов оценки, мониторинга и прогноза динамики биологических ресурсов охотничьего хозяйства» № FNWS-2022-0001).

Для цитирования: Степанов В. В., Сергеев А. А., Вечтомова Е. А., Зарубин Б. Е., Перевозчикова М. А. и др. Мясная продуктивность обыкновенной рыси (*Lynx lynx* Linnaeus, 1758) и пищевое качество получаемого мяса. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 778–793. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2609

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2609
https://elibrary.ru/QTYFGF

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

Meat Yield and Quality of *Lynx lynx* Linnaeus, 1758

Valery. V. Stepanov[1], Alexey A. Sergeev[1,*], Elena. A. Vechtomova[2], Boris E. Zarubin[1], Maria A. Perevozchikova[1,], Alexandra V. Zaushintsena[2]**

[1] *Russian Game Management and Fur Farming Research Institute, Kirov, Russia*

[2] *Kemerovo State University, Kemerovo, Russia*

Received: 24.03.2025
Revised: 19.10.2025
Accepted: 04.11.2025

**e-mail: metalbird@mail.ru,*
***e-mail: mperevozchikova@mail.ru*

© V.V. Stepanov, A.A. Sergeev, E.A. Vechtomova, B.E. Zarubin, M.A. Perevozchikova, A.V. Zaushintsena, 2025

Abstract.
The lynx (*Lynx lynx* Linnaeus, 1758) is a valuable game and fur farm animal. The article describes the game potential of the lynx in the Kirov Region, Russia, and the nutritional profile of lynx meat.
The morphometric and physicochemical analysis covered 137 samples of lynx meat, 90 of which were tested for trichinosis. The statistical analysis involved MS Excel and Statgraphics software, as well as the methods of Student's *t*-test, Fisher's test, the Newman-Keuls multiple comparison method, and the nonparametric Mann-Whitney test ($p \leq 0.05$).
Lynx meat demonstrated satisfactory nutritional value and sensory properties. The meat yield indicators made it possible to estimate the product value as 500 rubles/kg and its potential contribution to the regional economy (562,500 rubles if lynx is ever legalized as a game species). In terms of moisture content (50.47%), lynx meat was inferior to that of most conventional farm animals, except for pork. It contained 4.6 times as much ash (5.60%) as rabbit meat. In terms of protein content (25.14%), it demonstrated the highest indicators while being low in fat (1.81%) and calories (116.86 kcal/100 g). The highest ash content belonged to the meat of 18-month-old animals while the highest protein content was found in animals born in the year of consumption. The content of vitamin A was 4.0 times as low as in nutria meat but the content of vitamin E was 8.7 times as high. Lynx meat was rich in vitamins B_1, B_6, and B_{12} but contained little vitamins B_2, B_3, and B_4.
The sensory profile and physicochemical characteristics depended on the environmental conditions, diet, sex, age, physiological and reproductive status, season, and hunting methods. However, the high susceptibility to trichinosis in natural populations may affect the commercial potential of lynx meat. The data obtained can be used to develop state standards for lynx meat in the Russian Federation.

Keywords. *Lynx lynx*, lynx meat, meat yield, purchase price, chemical composition, nutritional value, contamination

Funding. The research was part of State Assignment No. 3684-r to All-Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, Kirov: Sustainable Use, Assessment, Monitoring, and Forecasting of Biological Resources in the Game Industry (No. FNWS-2022-0001).

For citation: Stepanov VV, Sergeev AA, Vechtomova EA, Zarubin BE, Perevozchikova MA, *et al.* Meat Yield and Quality of *Lynx lynx* Linnaeus, 1758. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):778–793. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2609

Введение

Рост населения и быстрое сокращение природных ресурсов определяют важность здорового и адекватного питания, наиболее ценным компонентом которого являются продукты животного происхождения [1]. Доступ потребителей к этим продуктам по более низким ценам и количество потребления животного белка в рационе – важные параметры, которые дают понимание об уровне развития страны [2]. Потребители обращают все больше внимания на качество мяса из-за повышенной осведомленности о питательной и пищевой ценности. Органолептические качества мяса также имеют большое значение с точки зрения потребительских предпочтений. При покупке потребители обычно ориентируются на внешний вид сырого мяса как на признак его качества. Критерии оценки потребляемого мяса связаны с мягкостью, сочностью, ароматом и вкусом. Потребители ценят мясо, обладающее нежной консистенцией, с высоким содержанием влаги, преобладанием мышечной ткани, с розовым цветом в сыром виде и мясным ароматом после кулинарной обработки [3, 4]. В этой связи мясо диких

животных представляет интерес как ценный продукт с хорошими гастрономическими свойствами.

Мясо диких животных используется на протяжении всей эволюции человечества и по-прежнему является важной частью основного рациона питания миллионов семей в тропиках, арктических и других удаленных регионах. Зачастую оно является наиболее доступным и широко используемым источником животного белка и микроэлементов. В некоторых регионах мясо диких животных занимает важное место в стратегиях жизнеобеспечения сельских поселений: его используют в качестве «резервного пищевого банка» или удовлетворения культурных потребностей. Оно также регулярно потребляется городскими жителями, но скорее как экзотика или элемент роскоши, чем как предмет первой необходимости [5]. В последние десятилетия эксплуатация диких животных ради мяса и дохода для сельских общин или коренных народов трансформировалась в получение товара для снабжения городских районов. Рост спроса на дикое мясо вызван ускорением роста населения, использованием более современных и эффективных методов охоты и открытием отдаленных районов для коммерческой охоты [6]. Одновременно это определило и необходимость активизации изучения мяса диких животных.

Цель данного исследования – изучить отдельные показатели мясной продукции обыкновенной рыси (*Lynx lynx* Linnaeus, 1758) и возможности ее использования как промыслового животного на территории Кировской области.

Объекты и методы исследования

Морфометрические параметры и образцы проб мяса для химических анализов взяты от животных, добытых в осенне-зимний сезон по официальным разрешениям на территории Кировской области и сопредельных территорий в период с 2010 по 2024 гг. Всего оценке подверглось 137 особей, а исследованию на трихинеллез – 90. Все добытые особи разделяли на три возрастные группы (сеголетки, полуторогодовалые, взрослые) по комплексу весовых и размерных параметров и контролировались по слоистым структурам зубов [7].

Все звери добыты путем отстрела или пойманы в капканы по разрешениям на добычу согласно действующему законодательству. Для анализа состава мяса использовали зверей, добытых путем отстрела. После добычи при невозможности оперативной обработки специалистом добытые животные замораживались при температуре –18 °С, без снятия шкуры и первичной обработки. Для дальнейшей работы туши доставляли в замороженном состоянии. После размораживания при температуре 20 °С добытые рыси взвешивались на электронных весах GARIN DS2 с точностью до 5 г, выполнялись необходимые линейные промеры. Туши обрабатывались следующим образом: производили снятие шкуры с последующей консервацией пресно-сухим способом, извлекали внутренние органы, удаляли конечности по кистевым суставам, отделяли голову по суставу между затылочной костью и первым шейным позвонком, отделяли хвост по суставу в основании. Полученную тушу считали мясной, проводили взвешивание. После этого производили отбор мышечной ткани по 4 группам (икроножная, жевательная, ножка диафрагмы, прямая мышца живота) для исследования на трихинеллез. Отбор проб для анализа состава мяса рыси проводили путем обвалки левой половины туши с удалением подкожного жира, жил, фасций по всем группам мышц совместно. В случаях наличия гематом или сильно разбитых участков тканей обвалку данных участков не производили. Убойный выход определялся путем расчета соотношения массы туши без шкуры, внутренних органов, конечностей, хвоста и головы к массе туши животного до начала первичной обработки. Полученное мясо дважды измельчали в волчке с диаметром отверстий 7,35 мм. Из фарша формировали пробу массой 700 г, упаковывали в вакуумные пакеты, снабжали биркой и замораживали при температуре –20 °С. К месту проведения анализов пробы доставляли в термоконтейнерах с хладоэлементами, обеспечивающими сохранность проб в замороженном состоянии в течение 72 ч.

Изучение физико-химического состава мяса рысей проводилось стандартными и общепринятыми методами:

– массовую долю воды – по ГОСТ 33319-2015;
– массовую долю общей золы – по ГОСТ 31727-2012;
– массовую долю белка – методом сжигания по Дюма (МВИ, свидетельство № 41-09);
– массовую долю жира – по ГОСТ 23042-2015;
– состав свободных углеводов – по ГОСТ 34134-2017;
– калорийность – расчетным методом;
– витамины водорастворимые – по ГОСТ 34258-2017;
– витамины жирорастворимые – по ГОСТ 32043-2012;
– определение минерального состава – в соответствии с МУК 4.1.1482-03 методом атомной эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной аргоновой плазмой.
– аминокислотный состав – по ГОСТ Р 55569-2013;
– определение важнейших аминокислот в сложных объектах биологического происхождения – методом обращенно-фазовой ВЭЖХ с получением фенилтиогидантоинов аминокислот [8].

За основу для отбора и формирования проб мяса для исследования взяты методические рекомендации по изучению продуктивности и качества мяса крупного рогатого скота института животноводства [9]. Данные по общему и химическому составу мяса сельскохозяйственных животных получены Кемеровским государственным университетом по результатам исследования мясной продукции из розничной сети.

Оценка размеров добычи рыси в Кировской области произведена по результатам ежегодных анкетных опросов охоткорреспондентов «Службы урожая» ВНИИОЗ, доверительных опросов заготовительных

организаций региона, анонимных опросов сдатчиков пушнины, специалистов охотничьего хозяйства районного звена и охотников на местах.

Статистический анализ проводился с использованием программного обеспечения MS Excel и Statgraphics общепринятыми методами [10]. Для описания выборок определяли среднее значение (M), ошибку среднего (m). Для проверки достоверности различий между двумя выборками использовали критерии Стьюдента, Фишера, метод множественного сравнения Ньюмена-Кейсла, а также непараметрические критерии Манна-Уитни. Нулевую гипотезу отклоняли на уровне значимости менее 0,05.

Результаты и их обсуждение

Обыкновенная рысь – хищник средних размеров, широко распространенный практически по всей лесной зоне северной и центральной части евразийского континента с относительно невысокой естественной плотностью, в значительной степени зависящей от обилия кормовых объектов и некоторых абиотических факторов [11, 12]. Основные мировые ресурсы рыси сосредоточены в России, по официальным данным, ее численность на территории страны варьирует в пределах 20–35 тыс. особей [13]. Однако есть основания полагать, что, как и в отношении других видов [14], эти оценки занижены. Из-за невысокой численности рысь достаточно уязвима к антропогенным воздействиям [15]. Опасность для нее представляют изменение мест обитания [16], сокращение численности жертв [17], незаконная охота [18, 19], гибель на автодорогах [20]. Как и другие крупные хищники, рысь часто вступает в конфликты с человеком, особенно в местах с высокой плотностью населения и развитым скотоводством [21]. Здесь, а также на окраинах ареала, плотности рыси обычно невысоки, зачастую становятся редкими и нуждаются в охране [22, 23]. На огромных относительно неосвоенных территориях Северной Евразии, включая таежную зону России, популяции рыси все еще благополучны, хищник является традиционным объектом охоты, а также рассматривается в качестве перспективного звероводческого вида [24]. Добывают рысь главным образом из-за ценной шкуры и далеко не все знают, что ее мясо съедобно и обладает высокими вкусовыми качествами [25].

В славянской и скандинавской культуре мясо рыси считалась съедобным, но употреблялось нечасто. Так, А. Черкасов [26] не внес рысь в раздел «съедных» (съедобных) видов зверей. И, по его словам, упоминания о ее пищевом использовании нет даже «туземным» (местным) населением. В «Обзоре промысловых охот в России» А. А. Силантьева [27] отмечалось: «… представители отряда хищных, кроме медведя и барсука, обыкновенно, в пищу не идут…». В то же время писатель-краевед М. С. Пыляев [28] упоминал, что русский промышленник А. С. Строганов, принимая гостей в селе Ильинское Пермского края, угощал их местной дичью: «Во второй перемене подавались тоже пикантные блюда: лосиные губы, разварные лапы медведя, жареная рысь. Кстати сказать, это самое старинное русское блюдо, теперь совсем забытое, употребляемо было при дворе царя Алексея Михайловича – рысь не считалась тогда несъедобной: мясо этого зверя отличается белизною». В начале XX в. В. Б. Гринберг [29] указывал: «Мясо рыси съедобно. Едят его не только многие сибирские охотники … но и его едят в Европе, в буржуазных слоях общества, как лакомое блюдо... оно имеет вид хорошей телятины, а вкусом напоминает мясо глухаря». Упоминается о вкусовых качествах мяса рыси и в коллективной монографии, посвященной биологии и хозяйственному использованию этого хищника [30]: «Мясо рыси приятное на вид, тонковолокнистое, без резкого запаха и не просто съедобное, а очень вкусное, …мясо (рыси) считается деликатесом». Прекрасные вкусовые качества мяса рыси подтверждают и авторы данной статьи, большинство из которых регулярно и уже длительное время употребляет его в пищу.

Коренное население североамериканского континента, где обитает близкий вид – канадская рысь (*Lynx canadensis*), традиционно использовало в пищу мясо хищника, а их потомки продолжают употреблять его и сейчас [31]. Индейские племена северо-западного побережья США, Аляски и юго-западной части Канады (белла-кула, чинуки, кри, хайда, квакиутль, маках, нутка, квилеты, сэлиш, тилламук, тлинкиты и др.), а также лабрадорские инуиты добывали рысь не только из-за шкуры, но и ради мяса, которое считали деликатесом. Индейцы тутчоне и тагиш очень любили мясо рыси и заготавливали ее жир [32]. Индейцы нуксалк употребляли рысь в пищу, но только изредка [33]. Индейцы штатов Монтана, Вашингтон, Орегон (пан-д'орей, спокана, сэлишы) употребляли в пищу мясо рыжей рыси (*Lynx rufus*) и других диких кошек [34]. Прочие индейские племена охотились на рысь ради шкуры и потребляли ее мясо только в случае, когда другие источники пищи были недоступны. Добывали рысь обычно самоловами во вторую половину осени и зимой, но при случае – и в другое время.

Канадские индейцы каска, поживавшие на юго-востоке Юкона, готовили рысь для немедленного употребления, а также мясо коптили и сушили. Обычно мясо рыси варили: после закипания воду выливали и наливали новую, кипятили во второй раз. Получившийся бульон использовали для приготовления супа. Дикий лук, другую зелень или кровь животных смешивали с бульоном, который использовали в качестве напитка, завершающего трапезу. Горячие камни из костра применяли для кипячения воды. Воду наливали в корзину, сделанную из плотно сплетенных расщепленных еловых корней, затем ставили на землю над горячими камнями. Другой метод кипячения воды заключался в том, чтобы вырыть яму, выстелить ее шкурой, а иногда и травой. Горячие камни, которые служили источником тепла, помещали сверху, затем накрывали еловой корой,

чтобы поддерживать температуру. Мясо нарезали на мелкие кусочки и бросали в кипяток. Его женщины подавали прямо на кусках древесины, коре или блюдах из тополя и березы. При употреблении мяса рыси использовали костяные ножи и ложки из дерева или бараньего рога. Женщины сохраняли мясо рыси, высушивая его на солнце в конце сентября и октябре [35]. Индейцы гитксан на севере Британской Колумбии свежевали и коптили мясо рыси, описывая его как светлое по цвету и похожее на кроличье по вкусу [36]. Мясо рыси считалось хорошим у индейцев слэйви (дене) на реке Форт-Нельсон [37]; кри Северного Квебека считали рысь отличной едой и отмечали, что типичный живой вес рыси составляет 17,0 фунтов, из которых 6,8 фунтов съедобны. Микмаки с побережья р. Конн, Ньюфаундленд, сообщали, что запеченная рысь по вкусу напоминает кролика. Тананы Аляски очень ценили рысий жир, используя его при приготовлении пищи [38].

В доступной литературе найти сведения о химическом составе и пищевой ценности мяса рыси не удалось. Следовательно, данное исследование будет первым шагом в этом направлении.

Мясная продуктивность рыси. Средняя масса мясной туши рыси с учетом возрастной структуры промысловой пробы (137 особей) составила 8,99 кг (табл. 1) с семикратной разницей между минимальными и максимальными показателями (2,53 и 17,99 кг соответственно).

Выход мяса от убойной массы добытых животных в среднем составил 69,47 % так же с большим разбросом между предельными показателями (min – 55,15 %; max – 73,83 %). Большие расхождения в предельных весовых показателях связаны как с их возрастными изменениями (1,6–2,2 раза), так и, в большей степени, с индивидуальной изменчивостью внутри возрастных групп (2,0–3,3 раза).

В отличие от фитофагов, хищные млекопитающие имеют небольшой по размерам кишечник, тонкую легкую шкуру, некрупную голову, что определяет большую долю мускулатуры в общей массе тела. Относительная масса мясной туши рыси колеблется в широких пределах, составляя в среднем 66,4–69,5 % у животных разных возрастных групп. Молодые и взрослые особи рыси имеют самую высокую относительную массу мясной туши по сравнению с дикими копытными и грызунами, мясо которых используют в пищу (рис.). Исследования мясной продуктивности охотничьих животных довольно разрознены и зачастую оперируют небольшими объемами данных, например [14, 39].

Наибольший выход мяса приходится на долю взрослых особей (69,47 %), у сеголетков и полуторогодовалых животных этот показатель практически одинаковый (66,63 и 66,44 % соответственно). Наиболее стабильный выход мясной продукции характерен для полуторогодовалых зверей (расхождения 9,16 %), а у сеголетков и взрослых особей весьма близки (17,52 и 18,68 %).

Аналогичная тенденция наблюдалась и у других видов. А. А. Южаков с соавторами [41] изучили мясо северных оленей разного возраста на территории Ямало-Ненецкого автономного округа и установили, что по всем исследованным показателям (живая масса, масса туши, площадь «мышечного глазка», диаметр

Таблица 1. Показатели мясной продуктивности рыси с территории Кировской области

Table 1. Lynx meat yield, Kirov Region, Russia

Показатель	n	M ± m	min–max	σ
Сеголетки (0+)				
Убойная масса, г	43	7346,31 ± 290,42^{A}	3805,00–12590,00	1859,59
Масса мясной туши, г	43	5067,07 ± 257,90^{A}	2530,00–8300,00	1364,67
Выход мяса, %	43	66,63 ± 0,88^{A}	54,88–72,40	4,64
Полуторогодовалые (1+)				
Убойная масса, г	14	11527,14 ± 639,95$^{A, B}$	7580,00–15310,00	2307,37
Масса мясной туши, г	14	7701,92 ± 525,22$^{A, B}$	4740,00–10120,00	1819,42
Выход мяса, %	14	66,44 ± 0,90$^{A, B}$	61,05–70,21	3,13
Взрослые (2+ и старше)				
Убойная масса, г	80	15681,97 ± 410,55^{B}	8240,00–25790,00	3625,86
Масса мясной туши, г	80	11176,25 ± 329,12^{B}	5330,00–17990,00	2528,04
Выход мяса, %	80	69,47 ± 0,36^{B}	55,15–73,83	2,80
Общий				
Убойный вес, г	137	12657,78 ± 419,62	3805,00–25790,00	4857,48
Масса мясной туши, г	137	8996,52 ± 346,33	2530,00–17990,00	3480,61
Выход мяса, %	137	68,28 ± 0,37	54,88–73,83	3,71

Примечание: различия между группами статистически значимы при $p < 0,05$: ^{A} – между сеголетками и полуторогодовалыми; ^{B} – между полуторогодовалыми и взрослыми особями.

Note: Differences between groups are statistically significant at $p < 0.05$: ^{A} – between yearlings and 18-month-olds; ^{B} – between 18-month-olds and adults.

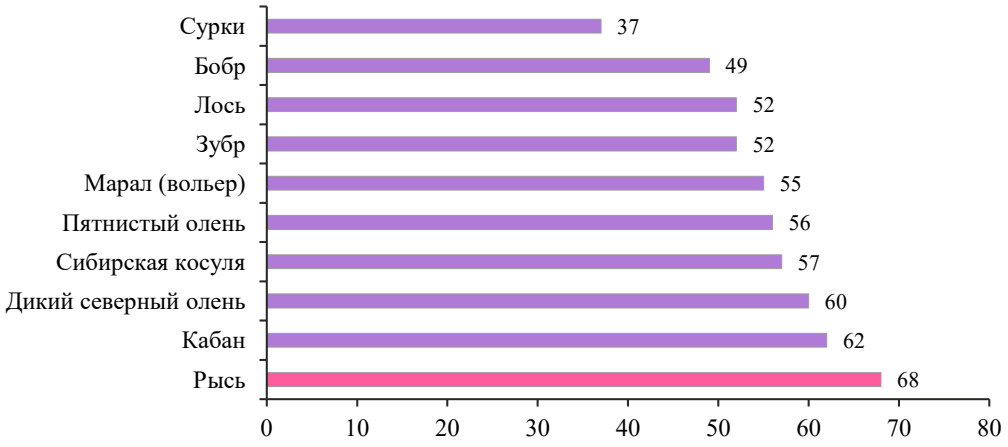


Рисунок. Выход мяса, %, некоторых промысловых животных (на основе [40] и данных авторов)

Figure. Meat yield, %: other game mammals [40] vs. lynx (our data)

Таблица 2. Общий состав мяса сельскохозяйственных животных

Table 2. General composition of meat from farm animals

Показатель	КРС	Свиньи	Овцы	Козы	Кролики	Нутрии
Вода, %	73,10	49,00	60,40	75,84	66,70	71,00
Зола, %	1,05	0,97	1,06	1,11	1,22	–
Белки, %	22,03	13,50	18,00	20,60	21,10	23,90
Жиры, %	4,99	25,00	11,40	2,31	11,00	4,70
Углеводы, %	0,05	0	0,58	0	1,00	0
Калорийность, ккал/100 г	133,23	279,00	176,92	103,19	187,40	137,90

Примечание: КРС – крупный рогатый скот.

Note: КРС – bovine cattle.

мускульного волокна, жира в мясном фарше, килокалорий в 100 г фарша), кроме убойного выхода, взрослые особи обладали значительными преимуществами перед молодыми. Таким образом, при расчете среднего размера убойной массы, массы мясной туши и выхода мяса необходимо учитывать возрастную структуру промысловой пробы.

Объем и стоимость продукции. За первую четверть XXI в. (с 1999–2000 по 2023–2024 гг.), по нашим оценкам, в регионе добыто 3139 рысей. Сезонная добыча вида весьма неравномерна и может различаться в 4,3 раза. Максимум добычи (215 особей) пришелся на охотничий сезон 2022–2023 гг., а минимум (50 особей) – на сезон 1999–2000 гг. При этом средний многолетний показатель добычи вида составил 125 особей.

Полученный показатель мясной продуктивности для Кировской области (масса мясной туши – 8996,52 г) применим при возрастной структуре пробы (0+; 1+; 2+ и >) 31,4:10,2:58,4 % соответственно.

Следовательно, среднегодовой размер производства мяса рыси в регионе можно оценить приблизительно в 1125 кг (масса мяса в тушах). В силу своей малочисленности на фоне других охотничьих видов животных, а, следовательно, и незначительных объектов добычи, мясо рыси не имеет широкого спроса в Кировской области. Закупку этой продукции ведет лишь одна фирма – «Дикоед». Согласно ее прейскурантам за ряд последних лет, 1 кг мяса рыси закупают по цене от 400 до 600 руб. Дороже только мясо тура (800–1000 руб. за 1 кг). При средней закупочной цене 500 руб. за 1 кг среднегодовой потенциал закупок рыси в области можно оценить в 562,50 тыс. руб.

Физико-химический состав мяса рыси. Мясо рыси не имеет прямых аналогов среди доместицированных видов животных, разводимых для получения мясной продукции. Поэтому проведен его сравнительный анализ с наиболее распространенными мясными сельскохозяйственными объектами: крупным рогатым скотом, свиньями, овцами, козами, кроликами и нутриями (табл. 2).

Максимальная доля влаги содержалась в мясе козы, золы – в крольчатине, белков – в мясе нутрии, жиров – в свинине. Свинина являлась самым калорийным продуктом. В то же время мясо свиней имело минимальные показатели по влаге, золе и белкам. Наименьшей жирностью и калорийностью характеризовалось мясо коз.

На фоне этих показателей мясо рыси уступало по содержанию влаги всем, кроме мяса свиней (табл. 3).

Таблица 3. Общий состав мяса рыси, %

Table 3. General composition of lynx meat, %

Показатель	min	max	M	± m	σ
Вода, %	16,90	66,70	50,47	4,95	16,41
Зола, %	4,02	7,44	5,61	0,31	1,02
Белки, %	21,02	31,47	25,14	0,83	2,76
Жиры, %	0,10	7,91	1,81	0,68	2,25
Углеводы, %	0	0	0	0	0
Калории, ккал/100 г	93,91	155,32	116,86	5,52	18,30

Таблица 4. Общий анализ мяса рыси по возрастным группам (M ± m)

Table 4. General composition of lynx meat by age (M ± m)

Показатель	Возрастные группы		
	Сеголетки (0+)	Полуторогодовалые (1+)	Взрослые (2+ и старше)
Вода, %	52,00 ± 10,12	56,30 ± 12,70	43,10 ± 5,00
Зола, %	5,42 ± 0,32	6,32 ± 0,57	5,11 ± 0,71
Белки, %	26,33 ± 2,01	25,67 ± 1,45	23,42 ± 1,03
Жиры, %	2,16 ± 0,52^{A}	0,41 ± 0,10^{A}	2,87 ± 2,12
Углеводы, %	0	0	0
Калорийность, ккал/100 г	124,75 ± 5,43	106,34 ± 5,10	119,48 ± 16,54

Примечание: различия между группами статистически значимы при $p < 0,05$: ^{A} – между сеголетками и полуторогодовалыми.

Note: Differences between groups are statistically significant at $p < 0.05$: ^{A} – between yearlings and 18-month-olds.

По содержанию золы мясо рыси в 4,6 раза превосходило крольчатину, а по содержанию белка – мясо нутрии.

Содержание жира в мясе рыси ниже даже, чем у мяса козы, самого постного среди всех сельскохозяйственных видов, и незначительно превышало его калорийность, уступая всем остальным исследуемым видам.

Среди животных разных возрастных групп наибольшее количество влаги содержалось в мясе взрослых животных (табл. 4), а наименьшее – у сеголетков.

Золой наиболее богато мясо полуторогодовалых зверей, а у сеголетков и взрослых количество золы ниже и схоже по значению. Наивысшей жирностью обладало мясо взрослых животных. Оно незначительно жирнее, чем у сеголетков и в 7 раз жирнее, чем у полуторогодовалых особей. Наиболее богато белком мясо сеголетков, с возрастом его содержание убывает. Аминокислоты – основная структурная часть белков (конечный продукт гидролиза белков).

Незаменимые аминокислоты не синтезируются в животном организме и поступают с пищей. Их наибольшее количество (5) с наивысшим процентным содержанием имелось в свинине (валин, изолейцитин, метионин, фенилаланин, гистидин), четыре аминокислоты с наивысшим содержанием – в говядине (лейцин, аргенин, лизин, треонин), и одна – в мясе нутрии (триптофан) (табл. 5).

По всему спектру незаменимых аминокислот средние показатели мяса рыси превышали по процентному содержанию аналогичные показатели мяса всех основных видов сельскохозяйственных млекопитающих от 1,26 (по валину) до 10,82 раза (по гистидину) (табл. 6).

Заменимые аминокислоты. Наибольшее количество заменимых аминокислот в максимальной дозе (4) содержалось в мясе нутрии (глицин, серин, тирозин, пролин), 3 – в мясе коз (аланин, аспарагиновая и глутаминовая кислоты) и по 1 – в свинине и говядине (цистеин и цистин соответственно).

По количеству заменимых аминокислот (7 из 9) мясо рыси превосходило мясо сельскохозяйственных видов животных от 1,3 (аспарагиновая кислота) до 16,0 раз (пролин) и только по двум незначительно уступало по содержанию аланина в 1,07 и в 1,40 раза по глутаминовой кислоте козлятине. Но и по этим параметрам отдельные особи могут превосходить сельскохозяйственные объекты от 2,0 до 5,0 раз.

Для сравнения мясо молодых северных оленей превосходило мясо взрослых животных по содержанию всех незаменимых аминокислот. По сумме незаменимых аминокислот мясо 18-месячных оленей превосходило мясо взрослых и 6-месячных животных на 36,3 и 17,8 % соответственно; по сумме заменимых аминокислот – на 62,5 и 10,2 %. С возрастом содержаниение оксипролина у оленей уменьшалось более чем в 2 раза. Белковый качественный показатель 18-месячных оленей выше данного показателя у 6-месячных на 18–41 %. Органолептические показатели мяса и бульона у 6-месячных оленей оценены экспертами как самые низкие. Вкусовые качества вареного мяса от 18-месячных

животных оказались наиболее высокими, а качество бульона – выше у взрослых оленей. Суммарная органолептическая оценка оленины при убое в возрасте 18 месяцев равна взрослым животным [41].

Примененные методы исследования и оборудование позволили установить наличие в мясе рыси 6 макроэлементов (калий, кальций, натрий, сера, фосфор), 6 микроэлементов (железо, медь, марганец, цинк, литий,

Таблица 5. Аминокислотный состав мяса сельскохозяйственных животных

Table 5. Amino acid composition of meat of farm animals

Показатель	КРС	Свиньи	Овцы	Козы	Кролики	Нутрии
Аминокислоты незаменимые, %						
Валин	1,168	1,221	1,107	1,103	1,064	0,944
Лейцин	2,035	1,987	1,596	1,716	1,734	–
Изолейцин	1,100	1,143	0,990	1,042	0,864	0,896
Треонин	1,091	1,062	0,300	0,981	0,913	0,918
Аргенин	1,616	1,556	1,219	1,512	1,469	–
Лизин	2,244	2,147	1,812	1,532	2,199	1,497
Метеонин	0,655	0,662	0,370	0,552	0,499	0,516
Фенилаланин	0,953	1,003	0,835	0,715	0,512	0,837
Триптофан	0,249	0,287	0,261	0,306	0,327	0,406
Гистидин	0,860	0,982	0,650	0,429	0,626	–
Аминокислоты заменимые, %						
Глицин	1,128	1,091	0,845	–	0,955	1,322
Аланин	1,432	1,383	0,983	5,490	1,469	1,617
Серин	0,971	1,008	0,619	–	0,843	1,154
Аспарагиновая кислота	2,286	2,259	1,806	6,650	1,870	2,772
Глутаминовая кислота	3,876	3,689	1,522	7,820	3,442	4,980
Цистеин	–	0,272	–	0,245	0,260	–
Цистин	0,260	–	0,245	0,245	0,259	–
Тирозин	0,869	0,957	0,690	0,633	0,464	1,087
Пролин	1,043	0,976	0,943	–	0,843	1,249

Примечание: КРС – крупный рогатый скот.
Note: КРС – bovine cattle.

Таблица 6. Аминокислотный состав мяса рыси

Table 6. Amino acid composition of lynx meat

Показатель	min	max	M	± m	σ
Аминокислоты незаменимые, %					
Валин	0,07	3,17	1,53	0,26	0,88
Лейцин	2,22	6,02	3,82	0,36	1,20
Изолейцин	0,18	13,82	4,22	1,08	3,58
Треонин	0,02	5,24	3,22	0,50	1,64
Аргенин	2,18	9,29	5,16	0,77	2,55
Лизин	0,27	14,53	7,28	1,29	4,27
Метеонин	0,65	5,11	2,45	0,42	1,39
Фенилаланин	0,42	6,32	3,68	0,52	1,74
Триптофан	0,69	4,54	2,67	0,37	1,24
Гистидин	3,54	15,03	10,60	0,96	3,20
Аминокислоты заменимые, %					
Глицин	0,50	4,32	3,06	0,36	1,19
Аланин	0,15	29,73	5,13	2,40	7,96
Серин	0,02	5,15	3,27	0,43	1,41
Аспарагиновая кислота	0,46	20,29	8,61	1,68	5,59
Глутаминовая кислота	0,29	17,53	5,60	1,46	4,85
Цистеин	0,08	3,03	1,14	0,27	0,90
Цистин	0,14	2,95	1,04	0,28	0,87
Тирозин	0,95	22,85	4,15	1,81	5,99
Пролин	2,58	36,10	19,99	2,82	9,37

кремний) и 5 ультрамикроэлементов (бор, барий, олово, титан, стронций) (табл. 7).

По подавляющему большинству выявленных макро- и микроэлементов мясо рыси всех возрастных групп превосходило мясо сельскохозяйственных (табл. 8) и некоторых диких животных [39]. Мясо рыси уступало всем видам мяса сельскохозяйственных животных только по содержанию калия и цинка; мясу нутрии – только по железу и марганцу.

Для сравнения с сельхозживотными из ультрамикроэлементов в распоряжении авторов имелись только показатели по содержанию олова у крупного рогатого скота, свиней и коз (0,75; 0,30 и 0,75 мкг/100 г соответственно). Его содержание даже в мясе полуторогодо-

Таблица 7. Минеральный состав мяса рыси по возрастным группам (M ± m)

Table 7. Mineral composition of lynx meat by age (M ± m)

Показатель	Возрастная группа		
	Сеголетки (0+)	Полуторогодовалые (1+)	Взрослые (2+ и старше)
Макроэлементы, мкг/100 г			
Калий	1162,50 ± 108,97	1175,00 ± 28,87	1250,00 ± 74,54
Кальций	1047,50 ± 181,07[C]	1275,00 ± 136,42[B]	1820,00 ± 56,76[B, C]
Магний	377,50 ± 9,86	420,00 ± 27,89	385,00 ± 13,74
Натрий	1322,50 ± 65,55[C]	1390,00 ± 27,89[B]	850,00 ± 186,07[B, C]
Сера	2225,00 ± 178,73	2175,00 ± 28,87	2400,00 ± 163,30
Фосфор	9725,00 ± 668,95[C]	9650,00 ± 74,54[B]	14300,00 ± 555,78[B, C]
Микроэлементы, мкг/100 г			
Железо	38,00 ± 6,94	36,75 ± 5,00	48,25 ± 6,24
Медь	12,00 ± 0,47[A]	18,00 ± 0,47[A, B]	23,50 ± 0,74[B]
Марганец	2,89 ± 0,01[A, C]	2,47 ± 0,14[A, B]	3,12 ± 0,07[B, C]
Цинк	15,75 ± 1,28	17,50 ± 3,67	19,75 ± 2,13
Литий	0,54 ± 0,02[C]	0,51 ± 0,01	0,48 ± 0[C]
Кремний	8,15 ± 0,15	8,32 ± 0,19	8,95 ± 1,18
Ультрамикроэлементы, мкг/100 г			
Бор	2,27 ± 0,07[C]	4,47 ± 2,51[B]	2,02 ± 0[B, C]
Барий	0,14 ± 0,17	0,18 ± 0,21	0,07 ± 0,09
Олово	3,95 ± 0,07[A, C]	3,22 ± 0,05[A]	3,27 ± 0,17[C]
Титан	0,80 ± 0,06	0,78 ± 0,05	0,68 ± 0,10
Стронций	0,002 ± 0,003	0,002 ± 0,003	–

Примечание: различия между группами статистически значимы при $p < 0,05$: [A] – между сеголетками и полуторогодовалыми; [B] – между полуторогодовалыми и взрослыми; [C] – между сеголетками и взрослыми особями.

Note: Differences between groups are statistically significant at $p < 0.05$: [A] – between yearlings and 18-month-olds; [B] – between 18-month-olds and adults; [C] – between yearlings and adults.

Таблица 8. Минеральный состав мяса сельскохозяйственных животных

Table 8. Mineral composition of meat of farm animals

Показатель	КРС	Свиньи	Овцы	Козы	Кролики	Нутрии
Макроэлементы, мкг/100 г						
Калий	3300,00	3730,00	1800,00	3850,00	3250,00	3473,30
Кальций	120,00	70,00	107,00	130,00	200,00	148,70
Магний	200,00	260,00	206,00	0,20	250,00	248,00
Натрий	650,00	480,00	469,00	820,00	570,00	508,10
Сера	2300,00	2200,00	1650,00	2300,00	2250,00	–
Фосфор	2050,00	2260,00	1672,00	1800,00	1900,00	2368,00
Микроэлементы, мкг/100 г						
Железо	27,00	5,00	22,00	28,00	33,00	68,78
Медь	1,62	1,00	1,80	3,00	1,30	1,51
Марганец	0,35	0,29	0,35	0,35	0,13	260,02
Цинк	46,70	16,00	31,00	40,00	31,00	25,87

Примечание: КРС – крупный рогатый скот.

Note: КРС – bovine cattle.

валых рысей в 4,3 раза выше, чем у крупного рогатого скота и коз, накопление данного ультрамикроэлемента нежелательно, оценить пути и механизмы его попадания и накопления в мясе рыси затруднительно ввиду сложности анализа пищевой цепочки и миграции особей. По содержанию стронция мясо рыси уступало свинине в 70 раз (0,7 мкг/100 г). По другим элементам материал для сравнения отсутствовал.

Проведенный анализ позволил выявить наличие в мясе рыси жирорастворимых витаминов А и Е и водорастворимых групп В (B_1, B_2, B_3, B_4, B_6, B_{12}) (табл. 9), что позволяет количественно сравнить их с показателями в мясе сельскохозяйственных животных (табл. 10).

Мясо нутрии содержало в 4,0 раза больше витамина А, чем мясо рыси; а витамина Е – меньше в 18,7 раза.

Витамины группы В разделились на две части: B_2, B_3, B_4 в большем количестве содержались в мясе сельхозживотных (коз, свиней, нутрий соответственно), а витамины B_1, B_6 и B_{12} – в мясе рыси.

Содержание витаминов в мясе зверей разных возрастных групп различалось значительно. В таблице 11 представлено высокое содержание наибольшего перечня витаминов в мясе взрослых животных (B_1, B_2, B_6, B_{12}, Е).

Мясо рыси как источник трихинеллеза. Как и другие кошачьи, рысь может быть источником серьезных инфекционных и паразитарных болезней, опасных для животных и человека: бешенства, туберкулеза, иерсиниоза [42], болезни Ауески [43], чумы плотоядных [44], блю-танга [45], короновирусной инфекции (SARS-CoV-2) [46]; ортопоксивирусных инфекций [47], токсоплазмоза [48, 49], протостронгилидозов [50]; троглостронгилеза [51, 52].

Одним из наиболее опасных антропогельминтозов, в распространении которого участвует рысь, считается трихинеллез. Серопревалентность трихинеллы в Европе у рыси в целом высока и составляет от 30 до 50 % [53]. В Финляндии экстенсивность инвазии варьировала от 8,3 до 80,0 % в зависимости от географического региона [54], в Эстонии составила 47,4–65,6 % [55, 56], а в Швеции – всего 5,0 % [57]. Из 13 описанных сегодня видов трихинелл у евразийской рыси обнаружены четыре: *Trichinella nativa, T. pseudospiralis, T. spiralis* и *T. britovi,* причем два последних встречаются чаще других [58, 59].

Широко распространен трихинеллез у рысей и в России. На территории Кировской области сформировался устойчивый природный очаг трихинеллеза. Носителями личинок *T. spiralis* в области являются 16 видов диких животных, и рысь играет значительную роль в эпизоотологии трихинеллеза. При изучении селективного расселения личинок установлено, что наиболее

Таблица 9. Содержание витаминов в мясе рыси, мкг/100 г

Table 9. Vitamin content in lynx meat, µg/100 g

Показатель	min	max	M	± m	σ
А (жирорастворимый)	0,007	0,058	0,025	0,004	0,015
B_1	0,25	32,12	17,55	3,63	12,03
B_2	0,02	0,15	0,09	0,01	0,04
B_3	0	7,44	0,72	0,64	2,12
B_4	3,25	57,18	14,31	4,26	14,149
B_6	0,95	4,87	2,54	0,42	1,39
B_{12}	2,53	5,87	3,71	0,33	1,11
Е (жирорастворимый)	0,25	32,12	17,55	3,63	12,03

Таблица 10. Содержание витаминов в мясе сельскохозяйственных животных, мкг/100 г

Table 10. Vitamin content in meat of farm animals, µg/100 g

Показатель	КРС	Свиньи	Овцы	Козы	Кролики	Нутрии
А (жирорастворимый)	0,02	0,001	–	–	0,010	0,100
B_1	0,1	0,7	0,07	0,1	0,14	0,06
B_2	0,19	0,2	0,2	0,5	0,18	0,22
B_3	4,9	8	6,2	3,8	–	–
B_4	70,0	57,8	90	70	115,58	123,90
B_6	0,37	0,7	0,35	0,4	0,47	–
B_{12}	0,003	0,0005	0,003	0,001	0,004	0,008
Е (жирорастворимый)	0,2	0,1	0,6	–	0,468	0,94

Примечание: КРС – крупный рогатый скот.

Note: КРС – bovine cattle.

Таблица 11. Содержание витаминов в мясе рыси разных возрастных групп, мкг/100 г (M ± m)

Table 11. Vitamin content in meat of lynxes of different age, μg/100 g (M ± m)

Показатель	Возрастная группа		
	Сеголетки (0+)	Полуторогодовалые (1+)	Взрослые (2+ и старше)
A (жирорастворимый)	0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,020 ± 0,003
B_1	3,20 ± 2,37[A, C]	24,45 ± 4,67[A]	24,98 ± 3,52[C]
B_2	0,05 ± 0,01[C]	0,08 ± 0,01[B]	0,13 ± 0,01[B, C]
B_3	1,90 ± 2,13	0,11 ± 0,05	0,17 ± 0,09
B_4	21,34 ± 13,96	7,52 ± 2,83[B]	14,06 ± 1,32[B]
B_6	1,98 ± 0,60[C]	1,50 ± 0,19[B]	4,15 ± 0,41[B, C]
B_{12}	3,45 ± 0,17[A, C]	2,65 ± 0,05[B]	5,03 ± 0,41[B, C]
E (жирорастворимый)	3,20 ± 2,37[A, C]	24,45 ± 4,67[A]	24,98 ± 3,52[C]

Примечание: различия между группами статистически значимы при $p < 0,05$: [A] – между сеголетками и полуторогодовалыми; [B] – между полуторогодовалыми и взрослыми; [C] – между сеголетками и взрослыми особями.

Note: Differences between groups are statistically significant at $p < 0.05$: [A] – between yearlings and 18-month-olds; [B] – between 18-month-olds and adults; [C] – between yearlings and adults.

интенсивно заселяются личинками ножки диафрагмы и диафрагма, мышцы головы и конечностей [60]. По данным Масленниковой [61], зараженность 32 рысей личинками трихинелл за период 2002–2021 гг. в Кировской области составила 43,80 %. Автор указал, что такому высокому проценту способствовало падение численности зайца-беляка, который составляет основу ее питания. Зараженность взрослых особей рыси в отдельные сезоны достигала 100 %.

В Центральном районе Нечерноземной зоны Российской Федерации, где трихинеллез широко распространен, высокая инвазия *T. spiralis* установлена у рысей: экстенсивности инвазии – 60,00 %; интенсивности инвазии (ИИ) 1–2 экземпляра [62].

В Амурской области у трех из девяти обследованных рысей обнаружен трихинеллез [63, 64]. Максимальное содержание личинок выявлено в подъязычной мышце 4,50 ± 0,50 лич/г; в жевательных мышцах ИИ = 4,50 ± 1,50 лич/г; в мышечной ткани языка ИИ = 4,00 лич/г и медиальной широкой мышце бедра ИИ = 4,00 лич/г. А минимальные показатели в длиннейшей мышце поясницы и межреберных мышцах с ИИ = 1,00 лич/г [65].

Зараженность рыси трихинеллезом на территории Якутии составила 66,60 ± 8,32 %. Ведущее значение диких плотоядных в качестве резервентов инвазии и источника трихинеллеза людей определяется слабым охватом этих животных ветеринарно-санитарной экспертизе. Недостаточный уровень санитарного просвещения населения приводит и к тому, что продукты охоты нередко оказываются причиной заражения трихинеллезом юдей или домашних плотоядных [66].

Трихинеллез у рыси встречается и на североамериканском континенте. Reichard *et al*. [67] определили распространенность и среднюю интенсивность заражения *Trichinella* spp. у рыжей рыси (*Lynx rufus*) из 41 округа штата Оклахома (США). Распространенность (95 % доверительный интервал) *Trichinella* spp. составила в среднем 5,9 % (3,7–9,2 %). Рыси, инфицированные *Trichinella* spp. обнаружены в 10 из 41 отобранного округа (24,4 %; 13,7–39,5 %). Среднее значение (M ± m) и медиана (диапазон) интенсивности заражения личинок *Trichinella* spp. составили 30,9 (39,8) и 9,6 (0,6–119,9) лич/г исследованной ткани. Результаты генотипирования показали, что 17 рысей инфицированы *T. murrelli*, и одна рысь инфицирована *T. pseudospiralis*.

Во всех публикациях, содержащих указания на возможность пищевого использования мяса рыси, авторы настойчиво предупреждают о необходимости тщательного ветеринарного контроля этого продукта, в первую очередь, на трихинеллез. Кроме того, сопоставление информации за разные годы [61], по нашему мнению, дает право полагать, что зараженность вида с годами увеличивается.

По мере взросления животных степень их зараженности этим опасным для человека заболеванием стремительно увеличивается. За второй год жизни зараженность рысей увеличивается в 2,3 раза, а во взрослом состоянии – в 5,2 раза по сравнению с первым годом жизни (табл. 12).

Если на первом году жизни (сеголетки) трихинеллезом заражалось лишь 16,0 % особей, то среди взрослых доля зараженных – 83,3 %. В среднем, по состоянию на конец первой четверти XXI в., в области заражено почти 60,0 % рысей.

В первых двух возрастных группах доля зараженных самцов в 1,8–1,7 раза выше, чем самок. Во взрослом состоянии зараженность самок в 1,2 раза больше, чем самцов (приближается к 100 %).

Возможность передачи опасных болезней и паразитов необходимо учитывать не только при употреблении в пищу мяса рыси, но и на стадиях первичной обработки, разделки и хранения туш добытых животных.

Таблица 12. Зараженность трихинеллезом рысей разных половозрастных групп

Table 12. Trichinosis in lynxes of different age and sex

Возрастная группа, пол	Исследовано особей	Выявлено зараженных особей	Зараженность, %
Сеголетки (0+) всего	25	4	16,0
♂	9	2	22,2
♀	16	2	12,5
Полуторогодовалые (1+) всего	11	4	36,4
♂	7	3	42,9
♀	4	1	25,0
Взрослые (2+ и старше) всего	54	45	83,3
♂	30	23	76,7
♀	24	22	91,7
Всего	90	53	58,9
♂	46	28	60,9
♀	44	25	56,8

Выводы

Рысь редко добывалась ради мяса, но возможность использования ее мяса в пищевых целях и даже как деликатесного продукта неоднократно отмечали в разных регионах в прошлом.

Масса добытых животных колебалась в пределах 3,80–25,79 кг. Выход мясной продукции с одного добытого зверя в среднем составил 68,28 % или 8,99 кг, но в зависимости от возраста животного варьировался от 2,53 до 17,99 кг.

По содержанию влаги (50,47 %) мясо рыси уступало мясу всех сельскохозяйственных животных, кроме свиней. По содержанию золы (5,60 %) мясо рыси в 4,6 раза превосходило крольчатину, а по содержанию белка (25,14 %) имело наивысшие показатели среди всех использованных в сравнении видов. Мясо рыси имело низкое содержание жира (1,81 %) и калорийность (116,86 ккал/100 г). В наибольшем количестве зола содержалась в мясе полуторогодовалых животных, а белок – животных текущего года рождения (сеголетков).

Содержание незаменимых аминокислот в мясе рыси в среднем выше, чем у всех рассмотренных сельскохозяйственных животных. По заменимым аминокислотам мясо рыси уступало другим видам только по аланину и глутаминовой кислоте. В мясе рыси зафиксировали 6 макроэлементов, 6 микроэлементов и 5 ультрамикроэлементов. Мясо рыси превосходило мясо сельскохозяйственных животных по содержанию кальция, магния, натрия, серы, фосфора, меди, олова и уступало им по содержанию калия, железа, марганца, цинка, стронция. Наиболее богато минеральными веществами мясо взрослых животных (2+ и старше).

Витаминный состав мяса рыси представлен витаминами А и Е (жирорастворимые); B_1, B_2, B_3, B_4, B_6, B_{12} (водорастворимые). Витамина А в нем в 4,0 раза меньше, чем в мясе нутрии, а витамина Е – в 8,7 раза больше. Витаминов B_2, B_3, B_4 больше в мясе сельскохозяйственных животных, а B_1, B_6, B_{12} – в мясе рыси.

Мясо рыси можно охарактеризовать как постное, низкокалорийное, с высоким содержанием большинства минеральных веществ и витаминов, богатое аминокислотами. Как и мясо других диких животных, его, безусловно, можно рассматривать в качестве экзотического, деликатесного и ценного компонента специального питания, включая лечебное и спортивное.

Мясо рыси в регионе имело высокую зараженность трихинеллезом (58,90 %). Минимальная экстенсивность отмечена у сеголетков, с возрастом она увеличивается, а у взрослых самок приближается к 100 %. Рацион из мяса рыси или его реализация приведет к необходимости строжайшей ветеринарно-санитарной экспертизы, что поспособствует повышению эффективности мониторинга борьбы с дальнейшим распространением этого опасного заболевания.

Рысь обладает ценным по составу мясом, отличающимся высокими вкусовыми качествами. Учитывая широкий ареал вида, различия в природных условиях, неоднородный состав кормовых объектов, региональные геохимические особенности в районах добычи, мясо рыси может иметь неоднородные характеристики и химический состав, на который также влияют пол, возраст, физиологический и половой статус, сезон, а также способы охоты. Главным препятствием к потреблению мяса рыси является высокая экстенсивность трихинеллезной инвазии в природных популяциях этого хищника.

Сегодня мясо рыси имеет спрос у заготовителей и потребителей продуктов животного происхождения. За последнюю четверть века ежегодный размер добычи рыси в Кировской области составил в среднем 125 особей. С учетом зараженности поголовья рыси трихинеллезом среднегодовое количество добытых особей, пригодных для пищевого использования, составляет 51, а объем мясной продукции – 459 кг на сумму 229,5 тыс. руб. При разведении рыси в зверохозяйствах предприятия смогут получать дополнительную прибыль за счет реализации ее мяса.

Полученные данные могут быть использованы при разработке и утверждении государственных стандартов на мясо рыси на территории Российской Федерации.

Критерии авторства

В. В. Степанов – концептуализация, методология, верификация данных, формальный анализ, администрирование данных, создание черновика рукописи, рукописи и ее редактирование; А. А. Сергеев – верификация данных, создание рукописи и ее редактирование, визуализация, администрирование проекта, руководство исследованием, управление и координация планирования и осуществления научно-исследовательской деятельности, получение финансирования; Е. А. Вечтомова – проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи; Б. Е. Зарубин – концептуализация, методология, верификация данных, формальный анализ, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, рукописи и ее редактирование; М. А. Перевозчикова и А. В. Заушинцена – верификация данных, создание рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с публикацией данной статьи.

Contribution

V.V. Stepanov provided conceptualization, methodology, data verification, formal analysis, data administration, drafting, and proofreading; A.A. Sergeev was responsible for data verification, drafting, proofreading, visualization, project management, as well as obtaining funding; E.A. Vechtomova conducted the research, verified the data, and wrote the manuscript; B.E. Zarubin provided conceptualization, methodology of research, verification, formal analysis, research, data administration, drafting, and proofreading; M.A. Perevozchikova and A.V. Zaushintsena verified the data and also drafted 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. Yaranoğlu B, Zengin M, Gökçe M, Avcilar ÖV, Postaci BB, *et al*. Chemical composition of meat from different species of animals. International Journal of Agriculture and Food Sciences. 2023;7(3):581–587. https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.3.12

2. Frunză G, Murariu OC, Ciobanu MM, Radu-Rusu RM, Simeanu D, *et al*. Meat quality in rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) and hare (*Lepus europaeus Pallas*) – A nutritional and technological perspective. Agriculture. 2023;13(1):126. https://doi.org/10.3390/agriculture13010126

3. Kumar SA, Kim H-J, Jayasena DD, Jo C. On-farm and processing factors affecting rabbit carcass and meat quality attributes. Food Science of Animal Resources. 2023;43(2):197–219. https://doi.org/10.5851/kosfa.2023.e5

4. Nutautaitė M, Racevičiūtė-Stupelienė A, Bliznikas S, Vilienė V. Enhancement of rabbit meat functionality by replacing traditional feed raw materials with alternative and more sustainable freshwater *Cladophora glomerata* macroalgal biomass in their diets. Foods. 2023;12(4):744. https://doi.org/10.3390/foods12040744

5. Fa JE, Funk SM, Nasi R. Eating wild animals. In: Hunting Wildlife in the Tropics and Subtropics. Cambridge: Cambridge University Press; 2022. pp. 1 – 37. https://doi.org/10.1017/9781316338704.002

6. Carvalho R, de Aguiar APD, Amaral S. Diversity of cattle raising systems and its effects over forest regrowth in a core region of cattle production in the Brazilian Amazon. Regional Environmental Change. 2020;20(2):44. https://doi.org/10.1007/s10113-020-01626-5

7. Клевезаль Г. А. Принципы и методы определения возраста млекопитающих. М.: Товарищество научных изданий КМК; 2007. 283 с. [Klevezal GA. Principles and methods for determining the age of mammals. Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2007. 283 p. (In Russ.)]

8. Руденко А. О., Карцова Л. А., Снарский С. И. Определение важнейших аминокислот в сложных объектах биологического происхождения методом обращённо-фазовой ВЭЖХ с получением фенилтиогидантоинов аминокислот. Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. № 2. С. 223–230. [Rudenko AO, Kartsova LA, Snarskiy SI. High performance liquid chromatography determination of the major amino acids in complex biological objects using phenylisothiocyanate derivatization. Sorption and Chromatography Processes. 2010;10(2):223–230. (In Russ.)] https://elibrary.ru/MUEQTX

9. Левантин Д. Л., Епифанов Г. В., Смирнов Д. А. и др. Методические рекомендации по изучению мясной продуктивности и качества мяса крупного рогатого скота. Дубровицы: ВИЖ; 1977. 54 с. [Levantin DL, Epifanov GV, Smirnov DA, *et al*. Methodological recommendations for studying meat yield and meat quality in cattle. Dubrovitsy: VIZh; 1977. 54 p. (In Russ.)]

10. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Элементарная биометрия. Петрозаводск: ПетрГУ; 2005. 104 с. [Ivanter EV, Korosov AV. Elementary biometrics. Petrozavodsk: PetrGU; 2005. 104 p.]

11. Sidorovich V. Behaviour and ecology of the Eurasian lynx. Minsk: Four quarters; 2022. 344 p.

12. Kiseleva NV, Poddubnaya NYa. Abundance of Eurasian lynx in the mountain taiga of the Southern Urals. Tomsk State University Journal of Biology. 2024;66:142–157. https://doi.org/10.17223/19988591/66/7

13. Вайсфельд М. А., Губарь Ю. П. Особенности распространения и промысловые ресурсы рыси в Европейской части России. Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. № 6. С. 72–79. [Vaisfeld MA, Gubar YuP. Lynx distribution and commercial resources in the European part of Russia. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2015;(6):72–79. (In Russ.)] https://elibrary.ru/VDOPMJ

14. Зарубин Б. Е., Козлов Ю. А., Экономов А. В., Колесников В. В., Степанов В. В. и др. Пищевая и техническая продукция бобрового промысла в Кировской области. Дальневосточный аграрный вестник. 2023. Т. 17. № 1. С. 40–51. [Zarubin BE, Kozlov YuA, Economov AV, Kolesnikov VV, Stepanov VV, *et al*. Food and technical products of beaver hunting in Kirov region. Far Eastern Agricltural Journal. 2023;17(1):40–51. (In Russ.)] https://doi.org/10.22450/19996837_2023_1_40

15. Grossmann CM, Patkó L. Did we achieve what we aimed for? Assessing the outcomes of a human–carnivore conflict mitigation and coexistence project in Europe. Wildlife Biology. 2024;(6):e01270. https://doi.org/10.1002/wlb3.01270

16. Premier J, Bastianelli ML, Oeser J, Anders O, Andren H, *et al*. Survival of Eurasian lynx in the human-dominated landscape of Europe. Conservation Biology. 2025;39(3):e14439. https://doi.org/10.1111/cobi.14439

17. Červený J, Krojerová-Prokešová J, Kušta T, Koubek P. The change in the attitudes of Czech hunters towards Eurasian lynx: Is poaching restricting lynx population growth? Journal for Nature Conservation. 2019;47:28–37. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2018.11.002

18. Khorozyan I, Heurich M. Patterns of predation by the Eurasian lynx *Lynx lynx* throughout its range: Ecological and conservation implications. Mammal Review. 2023;53(3):177–188. https://doi.org/10.1111/mam.12317

19. Arlettaz R, Chapron G, Kéry M, Klaus E, Mettaz S, *et al*. Poaching threatens the establishment of a lynx population, highlighting the need for a centralized judiciary approach. Frontiers in Conservation Science. 2021;2:665000. https://doi.org/10.3389/fcosc.2021.665000

20. Léna A, Paul M, Duchamp C. Analyses des causes de mortalité du Lynx et du Loup en France. Biodiversité, des clés pour agir. 2022;(2):9–13.

21. Davoli M, Ghoddousi A, Sabatini FM, Fabbri E, Caniglia R, *et al*. Changing patterns of conflict between humans, carnivores and crop-raiding prey as large carnivores recolonize human-dominated landscapes. Biological Conservation. 2022; 269:109553. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109553

22. Chapron G, Kaczensky P, Linnell JDC, Vonarx M, Huber D, *et al*. Recovery of large carnivores in Europe's modern human-dominated landscapes. Science. 2014;346(6216):1517–1519. https://doi.org/10.1126/science.1257553

23. Salvatori V, Balian E, Blanco JC, Carbonell X, Ciucci P, *et al*. Are large carnivores the real issue? Solutions for improving conflict management through stakeholder participation. Sustainability 2021;13(8):4482. https://doi.org/10.3390/su13084482

24. von Arx M, Kaczensky P, Linnell J, Lanz T, Breitenmoser-Würsten C, *et al*. Conservation status of the Eurasian lynx in West and Central Europe. Cat News Special Issue. 2021;14:5–8.

25. Целыхова Е. К. Охотничья кухня. Праздник на столе. М.: Вече; 2024. 256 с. [Celhova EK. Ohotnichya kuhnya. Prazdnik na stole. Moscow: Veche; 2024. 256 p. (In Russ.)]

26. Черкасов А. А. Записки охотника Восточной Сибири. СПБ: книгопродавца С. В. Звонарева; 1867. 707 с. [Cherkasov AA. Notes of a hunter in eastern Siberia. Saint-Petersburg: knigoprodavtsa S. V. Zvonareva; 1867. 707 p. (In Russ.)]

27. Силантьев А. А. Обзор промысловых охот в России. СПБ: типограф. В. Киршбаума; 1898. 419 с. [Silantyev AA. Overview of commercial hunting in Russia. Saint-Petersburg: tipograf V. Kirshbauma; 1898. 419 p. (In Russ.)]

28. Пыляев М. И. Старое житье: Очерки и рассказы бывших в отшедшее время обрядах, обычаях и порядках в устройстве домашней и общественной жизни. СПБ: типограф А. С. Суворина; 1892. 319 с. [Pylyayev MI. Old Ways: Essays and stories on bygone rituals, customs, and orders at home and in society. Saint-Petersburg: tipograf A. S. Suvorina; 1892. 319 p. (In Russ.)]

29. Гринберг Б. В. Рысь и росомаха. Их промысел и значение в охотхозяйстве СССР. М.: КОИЗ; 1933. С. 20–21. [Grinberg BV. Lynx and wolverine in the game industry of the USSR. Moscow: KOIZ; 1933. pp. 20–21.]

30. Матюшкин Е. Н., Вайсфельд М. А., Данилов П. И., Русаков О. С., Туманов И. Л. и др. Рысь: региональные особенности экологии, использования и охраны. М.: Наука; 2003. 523 с. [Matyushkin EN, Vaysfeld MA, Danilov PI, Rusakov OS, Tumanov IL, *et al*. Lynx: Regional peculiarities of ecology, use, and conservation. Moscow: Nauka; 2003. 523 p. (In Russ.)]

31. Mihesuah DA. Recovering our ancestors' gardens: Indigenous recipes and guide to diet and fitness. Revised Edition. Winnipeg: Bison Books; 2020. 384 p.

32. Berkes F, George PJ, Preston RJ, Hughes A, Turner J, *et al*. Wildlife Harvesting and Sustainable Regional Native Economy in the Hudson and James Bay Lowland, Ontario. Canada: Arctic. 1994;47(4):350–360.

33. Kuhnlein HV. Traditional and contemporary nuxalk foods. Nutrition Research. 1984;4(5):789–809. https://doi.org/10.1016/S0271-5317(84)80055-X

34. Walker DEJr, Sturtevant WC. Handbook of North American Indians: Plateau 12. Washington, DC: Smithsonian Institution Scholarly; 1998. 808 p.

35. Honigmann JJ. The Kaska Indians: An Ethnographic Reconstruction. Montana: Literary Licensing; 2012. 164 p.

36. People of 'Ksan. Gathering What the Great Nature Provided: Food Traditions of the Gitksan. Seattle, WA: University of Washington Press; 1980. 127 p.

37. Honigmann JJ. Ethnography and Acculturation of the Fort Nelson Slave. New Haven: Yale University Press; 1946. 169 p.

38. Kuhnlein HV, Humphries MM. Traditional Animal Foods of Indigenous Peoples of Northern North America. Quebec: Centre for Indigenous Peoples' Nutrition and Environment; 2017. 500 p.

39. Soriano A, Sánchez-García C. Nutritional composition of game meat from wild species harvested in Europe. In: Ranabhat CL, editor. Meat and Nutrition. 2021. 230 p. https://doi.org/10.5772/intechopen.97763

40. Козлов Ю. А., Сергеев А. А., Зарубин Б. Е., Экономов А. В. Мясная и техническая продукция от охоты на евразийского бобра (*Castor fiber*). Дальневосточный аграрный вестник. 2020. № 4. С. 64–75. [Kozlov YuA, Sergeev AA, Zarubin BE, Economov AV. Meat and technical products obtained from hunting the eurasian beaver (*Castor fiber*). Far Eastern Agricultural Journal. 2020;(4):64–75. (In Russ.)] https://doi.org/10.22450/1999-6837-2020-4-64-75

41. Южаков А. А., Лайшев К. А., Тюкалов Ю. А. Мясо северных оленей разного возраста. Все о мясе. 2021. № 2. С. 28–31. [Yuzhakov AA, Laishev KA, Tyukalov YuA. Meat of reindeer of different ages. Vsyo o Myase. 2021;(2):28–31. (In Russ.)] https://doi.org/10.21323/2071-2499-2021-2-28-31

42. Behnke R, Walzer C. Health, husbandry and management of Eurasian lynx (*Lynx lynx*). Vet Handbook and Husbandry Guidelines. 2020. 120 p.

43. Masot AJ, Gil M, Risco D, Jiménez OM, Núñez JI, *et al*. Pseudorabies virus infection (Aujeszky's disease) in an Iberian lynx (*Lynx pardinus*) in Spain: A case report. BMC Veterinary Research. 2017;13(1):6. https://doi.org/10.1186/s12917-016-0938-7

44. Lombardo MS, Mirolo M, Brandes F, Osterhaus ADME, Schütte K, *et al*. Case report: Canine distemper virus infection as a cause of central nervous system disease in a Eurasian lynx (*Lynx lynx*). Frontiers in Veterinary Science. 2023;10:1251018. https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1251018

45. Caballero-Gómez J, Sánchez-Sánchez M, Lorca-Oró C, de Mera IGF, Zorrilla I, *et al*. Bluetongue virus in the Iberian lynx (*Lynx pardinus*), 2010–2022. Emerging infectious diseases. 2024;30(10):2169–2173. https://doi.org/10.3201/eid3010.240235

46. Gómez JC, Cano-Terriza D, Segalés J, Vergara-Alert J, Zorrilla I, *et al*. Exposure to severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) in the endangered Iberian lynx (*Lynx pardinus*). Veterinary Microbiology. 2024;290:110001. https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2024.110001

47. Miller ER, Fowler ME. Zoo and Wild Animal Medicine. Volume 8. USA: Saunders. 2014. 792 p. https://doi.org/10.1016/C2012-0-01362-2

48. Ryser-Degiorgis M-P, Jakubek E-B, af Segerstad CH, Bröjer C, Mörner T, *et al*. Serological survey of Toxoplasma gondii infection in free-ranging Eurasian lynx (*Lynx lynx*) from Sweden. Journal of Wildlife Diseases. 2006;42(1):182–187. https://doi.org/10.7589/0090-3558-42.1.182

49. Bouchard É, Sharma R, Hernández-Ortiz A, Jung TS, Harms NJ, *et al*. Canada lynx (*Lynx canadensis*) as potential reservoirs and sentinels of *Toxoplasma gondii* in Northern Canada. Zoonotic Diseases. 2023;3(1):6–17. https://doi.org/10.3390/zoonoticdis3010002

50. Segeritz L, Anders O, Middelhoff TL, Winterfeld DT, Maksimov P, *et al*. New insights into gastrointestinal and pulmonary parasitofauna of wild Eurasian lynx (*Lynx lynx*) in the Harz Mountains of Germany. Pathogens. 2021;10(12):1650. https://doi.org/10.3390/pathogens10121650

51. Alić A, Traversa D, Duscher GG, Kadrić M, Di Cesare A, *et al*. *Troglostrongylus* brevior in an Eurasian lynx (*Lynx lynx*) from Bosnia and Herzegovina. Parasites & Vectors. 2015;8:653. https://doi.org/10.1186/s13071-015-1272-9

52. Панова О. А., Хрусталев А. В., Порфирьева Л. Ю. Обзор легочных нематодозов домашних кошек с описанием первого случая элюростронгилеза у кошки на территории России. Российский паразитологический журнал. 2022. Т. 16. № 1. С. 17–32. [Panova OA, Khrustalev AV, Porfiryeva LYu. Review of pulmonary nematodoses of domestic cats with description of the first case of aelurostrongylosis in a cat in Russia. Russian Journal of Parasitology. 2022;16(1):17–32. (In Russ.)] https://doi.org/10.31016/1998-8435-2022-16-1-17-32

53. Ryser-Degiorgis M-P. Causes of mortality and diseases of Eurasian lynx (*Lynx lynx*). In: Iberian Lynx Ex Situ Conservation: An Interdisciplinary Approach. 2009. pp. 275–289.

54. Airas N, Saari SA, Mikkonen T, Virtala AK, Pellikka J, *et al*. Sylvatic *Trichinella* spp. infection in Finland. Journal of Parasitology. 2010;96(1):67–76. https://doi.org/10.1645/GE-2202.1

55. Järvis T, Miller I, Pozio E. Epidemiological studies on animal and human trichinellosis in Estonia. Parasite. 2001;8(2 Suppl):S86–S87. https://doi.org/10.1051/parasite/200108s2086

56. Kärssin A, Häkkinen L, Vilem A, Jokelainen P, Lassen B. *Trichinella* spp. in Wild Boars (*Sus scrofa*), Brown Bears (*Ursus arctos*), Eurasian Lynxes (*Lynx lynx*) and Badgers (*Meles meles*) in Estonia, 2007–2014. Animals. 2021;11(1):183. https://doi.org/10.3390/ani11010183

57. Axen C, Brytting M, Bujila I, Chenais E, Dryselius R, *et al*. Wildlife disease surveillance in Sweden 2019. National Veterinary Institute, SVA's report series. Sweden: TMG Tabergs; 2020. 138 p.

58. Borza C, Kundnani NR, Dărăbuș G, Mederle N, Pascu C, *et al* Trichineloza: O prezență constantă la nivel mondial, cu implicații în sănătatea publică. Revista Română de Medicină Veterinară. 2021;31(2):92–96. [Borza C, Kundnani NR, Dărăbuș G, Mederle N, Pascu C, *et al*. Trichinellosis: A constant presents worldwide involved in the public health. The Romanian Review of Veterinary Medicine. 2021;31(2):92–96. (In Romanian)]

59. Marin AM, Marucci G, Dărăbuș G, Herman V, Cristina RT, *et al*. Caracterizarea moleculară a speciei Trichinella britovi la râs (*Lynx lynx* L.) provenit din județul bihor, Romania: Raport de caz. Revista Română de Medicină Veterinară. 2023;33(4):85–88. [Marin AM, Marucci G, Dărăbuș G, Herman V, Cristina RT, *et al*. Molecular characterization of Trichinella britovi in lynx (*Lynx lynx* L.) from Bihor county, Romania: A case report. The Romanian Review of Veterinary Medicine. 2023;33(4):85–88. (In Romanian)]

60. Жданова О. Б., Окулова И. И., Зарубин Б. Е., Домский И. А., Успенский А. В. и др. Морфологические особенности и распределение личинок трихинелл в мышцах у рыси. Российский паразитологический журнал. 2021. Т. 15. № 2. С. 17–23. [Zhdanova OB, Okulova II, Zarubin B, Domsky IA, Uspensky AV, *et al*. Morphological features and distribution of *Trichinella* sp. larvae in the muscles of the lynx. Russian Journal of Parasitology. 2021;15(2):17–23. (In Russ.)] https://doi.org/10.31016/1998-8435-2021-15-2-17-23

61. Масленникова О. В. Трихинеллез диких животных на территории Кировской области. Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. 2022. № 23. С. 315–320. [Maslennikova OV. Trichinellosis of wild animals in the territory of the Kirov region. Theory and practice of parasitic disease control. 2022;(23):315–320. (In Russ.)] https://doi.org/10.31016/978-5-6046256-9-9.2022.23.315-320

62. Крючкова Е. Н., Абалихип Б. Г., Соколов Е. А. Современная ситуация по трихинеллезу в центральном Нечерноземье Российской Федерации. Ветеринарный врач. 2019. № 5. С. 28–32. [Kriuchkova EN, Abalikhin BG, Sokolov EA. The current situation of trichinellosis in the central non-chernozem region of the Russian federation. The Veterinarny Vrach. 2019;(5):28–32. (In Russ.)] https://doi.org/10.33632/1998-698X.2019-5-28-32

63. Бондаренко Г. А., Соловьева И. А., Трухина Т. И., Иванов Д. А. Трихинеллез в природных условиях Амурской области. Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2021. № 3. С. 128–131. [Bondarenko GA, Solovyeva IA, Trukhina TI, Ivanov DA. Trichinosis in the natural conditions of the amur region. Vestnik of the far east branch of the Russian academy of sciences. 2021;(3):128–131. (In Russ.)] https://doi.org/10.37102/0869-7698_2021_217_03_21

64. Трухина Т. И., Бондаренко Г. А., Соловьева И. А. Зараженность трихинеллезом среди диких и домашних животных в Амурской области. Актуальные вопросы ветеринарной биологии. 2023. № 3. С. 52–59. [Trukhina TI, Bondarenko GA, Solovyova IA. Infection with trichinosis among wild and domestic animals in the amur region. Actual questions of veterinary biology. 2023;(3):52–59. (In Russ.)] https://doi.org/10.24412/2074-5036-2023-3-52-59

65. Бондаренко Г. А., Соловьева И. А., Трухина Т. И. Особенности распределения личинок трихинелл в мышцах диких животных. Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. 2024. № 25. С. 57–61. [Bondarenko GA, Solovyeva IA, Trukhina TI. Distribution pattern of trichinella larvaes in muscles of wild animals. Theory and practice of parasitic disease control. 2024;(25):57–61. (In Russ.)] https://doi.org/10.31016/978-5-6050437-8-2.2024.25.57-61

66. Коколова Л. М. Трихинеллез у диких и домашних животных Якутии. Тенденции развития науки и образования. 2019. № 46–5. С. 80–83. [Kokolova LM. Trichinosis in wild and domestic animals of Yakutia. Trends in science and education. 2019;(46–5):80–83. (In Russ.)] https://doi.org/10.18411/lj-01-2019-110

67. Reichard MV, Sanders TL, Prentiss NL, Cotey SR, Koch RW, *et al*. Detection of *Trichinella murrelli* and *Trichinella pseudospiralis* in bobcats *(Lynx rufus*) from Oklahoma. Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports. 2021;25:100609. https://doi.org/10.1016/j.vprsr.2021.100609

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Степанов Валерий Вячеславович / Valery V. Stepanov ORCID 0009-0002-1553-3670; eLIBRARY SPIN 6974-5095
Сергеев Алексей Анатольевич / Alexey A. Sergeev ORCID 0000-0002-9461-5131; eLIBRARY SPIN 2315-9925
Вечтомова Елена Александровна / Elena. A. Vechtomova ORCID 0000-0001-6842-4537; eLIBRARY SPIN 3569-8977
Зарубин Борис Евгеньевич / Boris E. Zarubin ORCID 0009-0004-5627-2192; eLIBRARY SPIN 6254-6898
Перевозчикова Мария Александровна / Maria A. Perevozchikova ORCID 0000-0003-3638-3712; eLIBRARY SPIN 3931-2574
Заушинцена Александра Васильевна / Alexandra V. Zaushintsena ORCID 0000-0003-4645-828X; eLIBRARY SPIN 4324-6460

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2607
https://elibrary.ru/NHTAQK

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Математическая оценка изменения углеводного и белкового профилей молока при термической нагрузке

И. А. Барковская*, В. Ю. Ярышев, В. Г. Блиадзе, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова, В. В. Кондратенко, А. Г. Галстян

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 05.06.2025
Принята после рецензирования: 07.07.2025
Принята к публикации: 05.08.2025

**e-mail: i_barkovskaya@vnimi.org*

© И. А. Барковская, В. Ю. Ярышев, В. Г. Блиадзе, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова, В. В. Кондратенко, А. Г. Галстян, 2025

Аннотация.
Вопрос разработки новых методов оценки и прослеживаемости качества пищевой продукции на всех этапах жизненного цикла остается актуальным для агропромышленного комплекса России, в том числе и для молочного сектора. Внедрение математических методов оценки в структуру контроля качества продукции является перспективным направлением для изучения. Цель исследования – разработать математический подход к оценке кинетики образования продуктов изменения белкового и углеводного профилей молока для дальнейшего прогнозирования и практических исследований их накопления в ходе технологического процесса и трансформации во время хранения сухих молочных консервов.
Объект – молоко при разных температурных режимах обработки и продолжительности воздействия. Исследование основано на анализе концентраций соединений-маркеров изменения углеводного и белкового профилей молока при температурной обработке. Для этого проведен подбор научных работ на русском и английском языках за период 1985–2025 гг. с применением ресурсов электронных библиотек eLIBRARY.RU, Google Scholar, CyberLeninka, PubMed и ScienceDirect. Для математической оценки углеводов применяли уравнения псевдонулевого порядка и Аррениуса, для оценки изменения белковой составляющей – уравнение первого порядка. Алгоритм расчета реализован на языке Python.
Установлены зависимости накопления лактулозы, гидроксиметилфурфурола и фурозина от интегральной тепловой нагрузки на молоко. Определены величины энергий активации, позволяющие получить максимальную линейность: 130 кДж/моль (для лактулозы и фурозина) и 85 кДж/моль (для гидроксиметилфурфурола). Выявлено, что предложенная модель расчетов не подходит для оценки накопления продуктов изменения углеводного профиля при длительном температурном воздействии ввиду более глубоких изменений продукта. β-лактоглобулин в большей степени подвержен влиянию температур, чем α-лактальбумин. Рассчитаны значения энергий активации для сывороточных белков: 72,1 и 85,1–85,7 кДж/моль соответственно.
Разработанный подход позволяет количественно оценивать термическую нагрузку на молоко и прогнозировать качество продуктов его переработки. Результаты исследования могут быть использованы в пищевой промышленности для контроля качества пищевых продуктов и коррекции сроков годности, в том числе при производстве сухих молочных консервов.

Ключевые слова. Математическое моделирование, качество молока, сухое молоко, маркеры термообработки

Для цитирования: Барковская И. А., Ярышев В. Ю., Блиадзе В. Г., Туровская С. Н., Илларионова Е. Е. и др. Математическая оценка изменения углеводного и белкового профилей молока при термической нагрузке. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 794–806. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2607

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2607
https://elibrary.ru/NHTAQK

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

Mathematical Assessment of Carbohydrate and Protein Profiles of Milk under Thermal Stress

Irina A. Barkovskaya*, Vladislav Yu. Yaryshev, Vladimir G. Bliadze, Svetlana N. Turovskaya, Elena E. Illarionova, Vladimir V. Kondratenko, Aram G. Galstyan

All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia

Received: 05.06.2025
Revised: 07.07.2025
Accepted: 05.08.2025

**e-mail: i_barkovskaya@vnimi.org*

© I.A. Barkovskaya, V.Yu. Yaryshev, V.G. Bliadze, S.N. Turovskaya, E.E. Illarionova, V.V. Kondratenko, A.G. Galstyan, 2025

Abstract.
The dairy industry needs new methods for food quality assessment at all stages of production and storage. Mathematical methods offer efficient tools of product quality control. This article introduces a mathematical approach to assessing the kinetics of protein and carbohydrate profiles of milk powder to predict their transformations throughout production and storage.
The study featured milk at different processing temperatures and exposure times. The analysis focused on the concentrations of compounds that mark the changes in the carbohydrate and protein profiles of milk during heat treatment. The equation of pseudo-zero-order and the Arrhenius equation were applied to carbohydrates while a first-order equation made it possible to assess the changes in proteins. The calculation algorithm was processed in Python.
The lactulose, hydroxymethylfurfural, and furosine accumulations proved to depend on the integral heat load. The activation energies that provided the linearity maximum were as follows: 130 kJ/mol for lactulose and furosine; 85 kJ/mol for hydroxymethylfurfural. The calculation model failed to assess the accumulation of carbohydrate profile products during prolonged thermal exposure due to more profound product changes. β-lactoglobulin appeared to be more susceptible to thermal effects than α-lactalbumin. The activation energies for whey proteins were 72.1 and 85.1–85.7 kJ/mol, respectively.
The new mathematical approach provided a reliable quantitative assessment of thermal stress that can be used for food quality control and shelf-life adjustments, e.g., in milk powder production.

Keywords. Mathematical modeling, milk quality, milk powder, heat treatment markers

For citation: Barkovskaya IA, Yaryshev VYu, Bliadze VG, Turovskaya SN, Illarionova EE, *et al.* Mathematical Assessment of Carbohydrate and Protein Profiles of Milk under Thermal Stress. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4): 794–806. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2607

Введение

Коровье молоко является сложносоставным продуктом, обладающим уникальной композицией важнейших питательных веществ: белка, жира, молочного сахара, минеральных солей, витаминов, ферментов [1, 2]. Их количество и соотношения определяют пищевую ценность молока и обуславливают широкую востребованность потребителями [3, 4]. Еще одним из его преимуществ является возможность преобразования из жидкой формы в концентрированную путем удаления влаги при минимальном изменении нативных характеристик, за счет чего сухое молоко имеет потенциал к длительному хранению [1, 4, 5]. Сухое молоко также является ценным источником макро- и микронутриентов и признано полноценным для удовлетворения потребностей роста, развития детей, улучшения их пищевого статуса, а также для устранения распространенных проблем со здоровьем среди пожилого населения [2, 6–9]. Кроме того, сухое молоко является сырьевым ингредиентом в производстве различной пищевой продукции [5, 7, 10]. Таким образом, субъекты потребления сухого молока (в повседневном рационе или промышленной переработке) имеют неослабевающий интерес к его качеству, безопасности и свойствам, которые зависят от различных факторов (сырье, технологические операции, условия и сроки хранения) [4, 11].

В производстве сухого молока, как и любой другой молочной продукции, тепловая обработка является важной и обязательной частью технологии, эффективность которой обеспечивает микробиологическую безопасность и инактивацию большей части ферментов (в т. ч. липаз и протеаз) [3, 12, 13]. В промышленной практике тепловую обработку в зависимости от азотного индекса сывороточных белков классифицируют следующим образом: низкая – 75 °C, 15 с;

средняя – >75 °С, 1–2 мин; высокая – 120 °С, 60 с [14]. При низкотемпературной обработке концентрация неденатурированных сывороточных белков составляет более 6,0 мг/г; среднетемпературной – от 1,51 до 5,99 мг/г; высокотемпературой – менее 1,5 мг/г [10, 14, 15]. Класс термообработки обуславливает рациональность использования сухого молока, например, низкого класса – для производства кисломолочной продукции, сыров; среднего – для мороженого; высокого – для выпечки и др. [10, 14, 16–18]. Однако интенсивность и продолжительность воздействия нагревания неизбежно вызывают сложные химические и физические изменения составных частей молочной системы, влияют на хранимоспособность и функционально-технологические свойства (растворимость, диспергируемость, смачиваемость и др.) сухого молока [10, 12, 19, 20].

Тепловая обработка молока может порождать окислительные и деградационные (протеолитические и липолитические) процессы в белковом и жировом профилях, а также протекание реакции Майяра между белками и молочным сахаром, которые не прерываются в процессе дальнейшего хранения сухого молока и часто могут приводить к ухудшению его качества [21, 22].

Реакции окисления белков и липидов оказывают важное влияние на приемлемость использования сухого молока потребителями. Эти процессы сопровождают друг друга и индуцируются свободнорадикальными цепными реакциями [21, 23]. Окисление белков – это ковалентная модификация, которая возникает в результате прямой реакции с индукторами (активными формами кислорода) свободных радикалов или непрямой реакции со вторичными продуктами окисления. В первом случае индукторы свободных радикалов напрямую воздействуют на остов основной пептидной цепи и на боковые цепи аминокислот: захватывают и связываю водород, добавляют кислород и расщепляют химические связи, что приводит к разрыву основной белковой цепи или ковалентному сшиванию и окислению аминокислот. При непрямой реакции окисления в результате взаимодействия промежуточных продуктов окисления жиров (основными из которых являются гидропероксиды) с белками по *ε*-аминогруппе лизина образуются амидные продукты. При этом летучие соединения, образующиеся в результате распада гидропероксидов, такие как альдегиды, кетоны, сложные эфиры, спирты, вызывают пороки вкуса и запаха. Индуцированию окисления белков способствует образующийся при окислении жиров такой реакционноспособный альдегид, как малоновый диальдегид [21]. Park и Drake [24] привели исследование влияния тепловой обработки молока (от 85 до 125 °С) в сочетании с различной продолжительностью выдержки (от 10 до 240 с) при производстве сухого цельного молока в процессе длительного хранения. Так, температурные режимы выше 95 °С с выдержкой более 20 с являлись эффективными для стабилизации окислительной порчи. Stapelfeldt *et al.* [24] установили наименьшую чувствительность к окислительным изменениям и ферментативному потемнению образцов сухого цельного молока при обработке температурой 88 °С в течение 20 с.

Протеолиз и липолиз – ключевые негативные гидролитические процессы в сухом молоке, вызываемые ферментами, которые вырабатывают психротрофные бактерии. Эти ферменты отличаются термостойкостью и частично сохраняют активность даже после термической обработки, применяемой в молочной промышленности, такой как пастеризация или ультрапастеризация. При хранении (особенно длительном) процесс гидролиза белков и жира под действием ферментов продолжается, что приводит к потере питательных свойств, возникновению органолептических пороков и сокращению сроков годности готовой продукции [21].

Еще одним негативным процессом, протекающим в сухом молоке, является сложная неферментативная реакция (реакция Майяра), инициируемая окислительно-восстановительной реакцией между восстанавливающим дисахаридом (лактозой) и аминокислотами белков во время термической обработки молока и дальнейшего хранения. На начальной стадии происходит лактозилирование белков (образование продуктов Амадори), что приводит к снижению доступности лизина, усвояемости белка и потере пищевой ценности молочной системы. Затем следует окислительная деградация продуктов Амадори с образованием карбонильных соединений. Протекание реакции зависит от pH системы: при pH менее 7,0 продукты перегруппировки Амадори приводят к образованию фурфурола или гидроксиметилфурфурола (ГМФ); при pH более 7,0 – к формированию восстановленных кетонов или в последствии расщепляются на другие специфические соединения. Обладая высокой реакционной способностью, перечисленные соединения продолжают участвовать в последующих стадиях меланоидинообразования. На конечной стадии реакции Майяра протекают сложные процессы: образуются конечные продукты гликирования [12, 21]. В исследовании [25] с применением методов протеомики представлены данные об умеренном увеличении количества лактозилированных лизинов и белков при температурах от 85 до 130 °С и резко возрастающем – при 140 °С. В *κ*-казеине при этой температуре было лактозилировано 6 из 10 остатков лизина, *β*-лактоглобулине – 9 из 16, *α*-лактальбумине – 6 из 12, *α*S1-казеине – 5 из 15. Средне- и высокотемпературную тепловую обработку (пастеризацию и ультрапастеризацию) можно идентифицировать по наличию лактозилирования K14 в *β*-лактоглобулине, а лактозилирование лактотрансферрина свидетельствует об умеренном тепловом воздействии. В исследовании сухого цельного молока [26], подвергнутого различным температурным нагрузкам, в процессе хранения (18 месяцев) определили фурозин, фурфуролы и конечные продукты гликирования. Количество фурозина уве-

личилось в 2,5–3,0 раза при высокотемпературной обработке и в 5,7–8,4 раза – при низкотемпературной. Содержание ГМФ в сухом молоке, выработанном с использованием высоких температур, при хранении было в 1,4–2,4 раза выше, чем в низкотемпературно обработанном молоке. Увеличение количества Nε-(карбоксиметил)лизина и Nε-(карбоксиэтил)лизина в высокотемпературном молоке было больше, чем в низкотемпературном – в 3,4–4,9 и 3,1–3,4 раза для Nε-(карбоксиметил)лизина и в 3,4–4,2 и 2,7–3,0 раза для Nε-(карбоксиэтил)лизина. Кроме того, при температурной обработке молока происходит образование лактулозы, что также негативно сказывается на качестве готового продукта. Лактулоза – результирующее соединение пространственных изменений лактозы – перегруппировки Лобри де Брюйна-Альберта ван Экенштейна [27]. Ее формирование в молочной системе предсказать легче, чем образование продуктов более сложного процесса – реакции меланоидинообразования ввиду нестабильности и большого количества образующихся продуктов изменения углеводного профиля.

Многие исследователи [12, 21] совершали попытки систематизировать механизмы реакций, происходящих при тепловой обработке молока и приводящих к порче молочной продукции, в т. ч. сухого молока, и определить их потенциальные маркеры. Однако следует отметить недостаточное количество исследований, посвященных комплексной оценке потери качества сухого молока в результате изменения белкового, углеводного и жирового профилей при тепловой нагрузке. Таким образом, восполнение данного пробела путем разработки специального инструмента скоринга основных составных частей молочной системы является актуальным.

Цель исследования – разработать математический подход к оценке кинетики образования продуктов изменения белкового и углеводного профилей молока при разной температурной нагрузке для дальнейшего прогнозирования и практических исследований их накопления в ходе технологического процесса и трансформации во время хранения сухих молочных консервов. В перспективе результаты исследования позволят сформулировать перечень маркеров, позволяющий определять сухое молоко с истекающим сроком годности для предотвращения его переработки при производстве других пищевых продуктов.

Объекты и методы исследования

Для достижения поставленной цели осуществлен поиск исследований, освещающих изменение состава белкового и углеводного профилей молока при разных режимах термической нагрузки на систему. Подбор научных работ проводили с применением ресурсов электронных библиотек eLIBRARY.RU, Google Scholar, CyberLeninka, PubMed и ScienceDirect. Анализ включал эмпирические и обзорные научные статьи, а также главы из книг на русском и английском языках за период 1985–2025 гг. Источники включали информацию о количественном содержании соединений-маркеров тепловой нагрузки в молоке при разных режимах обработки (температура (140 и 90 °C) и продолжительность воздействия). Отбор публикаций реализовывали с использованием ключевых слов и словосочетаний: концентрация фурозина в молоке (furosine in heated milk), формирование лактулозы в молоке (lactulose in heated milk), образование гидроксиметилфурфурола в молоке (hydroxymethylfurfural in heated milk), изменение белков в термообработанном молоке (protein changes in heated milk).

Метод оценки кинетики изменения углеводного профиля молока. Рассмотрим упрощенную реакцию образования продуктов тепловой обработки молока (1):

$$A \xrightarrow{T} B \quad (1)$$

где A – обобщенный прекурсор; B – обобщенный маркер тепловой обработки (лактулоза, гидроксиметилфурфурол, фурозин). Для большинства продуктов, образующихся при тепловой обработке, выполняется соотношение (2) [28]:

$$[B] << [A]_0 \quad (2)$$

где $[A]_0$ – концентрация обобщенного прекурсора в начале тепловой обработки.

Исходя из того, что количество образовавшегося маркера (B) всегда значительно меньше количества прекурсора (A_0), можно считать, что реакция образования маркера тепловой обработки имеет псевдонулевой порядок по прекурсору [28]. Поскольку значимого изменения концентрации A за время реакции не происходило, в любой момент времени при выполнении (2) $[A] \cong [A]_0$. В таком случае для описания кинетики процесса применимо уравнение (3):

$$[B] = [B]_0 + kt \cong kt \quad (3)$$

где $[B]_0$ – концентрация обобщенного маркера в начале тепловой обработки; k – эффективная константа скорости реакции, моль/(л·с); t – время, с.

Константа скорости процесса изменения состава углеводного профиля молока (k) зависит от температуры, согласно уравнению Аррениуса (4):

$$k = k_0 exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (4)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель; E_A – энергия активации, Дж/моль; R = 8,314 Дж/(моль·К), универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, К.

Так как в случае тепловой обработки молока для достижения заданной температуры необходимо время, $T(t')$, выражение (3) можно преобразовать к виду (5), интегрируя зависимость (4) в пределах, соответствующих продолжительности обработки молока:

$$[B] = \int_0^t k_0 exp\left(-\frac{E_A}{RT(t')}\right)dt' = k_0 \int_0^t exp\left(-\frac{E_A}{RT(t')}\right)dt' = k_0 X_R \quad (5)$$

$$X_R = \int_0^t exp\left(-\frac{E_A}{RT(t')}\right)dt'$$

где X_R – интеграл, соответствующий степени протекания реакции при заданной температуре и продолжительности обработки.

Из выражения (5) видно, что зависимость $[B] = f(X_R)$ должна являться прямой линией [29].

В настоящей работе предложен алгоритм численного интегрирования, основанный на следующем: кинетика образования маркеров тепловой обработки описывается системой связанных дифференциальных уравнений; параметры реакции могут быть представлены в виде двумерных зависимостей, отражающих функциональную связь между тремя ключевыми показателями процесса (температура, продолжительность термического воздействия и концентрация маркера). Данный подход применен для моделирования кинетики образования лактулозы, гидроксиметилфурфурола (ГМФ) и фурозина. Хотя механизм образования ГМФ и фурозина не подчиняется элементарной модели псевдонулевого порядка (поскольку условие не выполняется на всех стадиях последовательных процессов [30]), разработанный подход демонстрирует удовлетворительное соответствие (коэффициент детерминации $R^2 \geq 0{,}95$) с экспериментальными данными, полученными в разных исследованиях. Это позволяет перейти к компактному описанию кинетики формирования маркеров тепловой обработки в молоке в виде двумерного изображения.

Алгоритм расчета X_R в соответствии с выражением (5) реализован на языке Python. Рассматривали несколько наиболее распространенных режимов термообработки молока: ультравысокотемпературный (УВТ) (прямой и косвенный) и модельный, подразумевающий непосредственное воздействие заданной температуры в течение определенного времени, без учета промежуточных стадий, равные температурам 140 и 90 °C соответственно. Расчет интеграла выполняли, разбивая заданный временной диапазон на участки (1000 равных отрезков) и вычисляя площадь под каждым из них по методу трапеций [31]. Относительная ошибка интегрирования не превышала $2{,}7\times10^{-4}$ %.

Метод оценки кинетики изменения белкового профиля молока. Термическая инактивация сывороточных белков является реакцией первого порядка [31], в таком случае справедливо уравнение (6):

$$\frac{[A]}{[A]_0} = exp(-kt) \quad (6)$$

где $[A]_0$ – исходная концентрация белка; $[A] = [A](t)$ – концентрация неденатурированного белка в системе при выдержке в заданной температуре в момент времени $t > 0$.

Логарифмируя уравнение (6) и учитывая зависимость (4), получим (7):

$$ln\frac{[A]_0}{[A]} \times \frac{1}{t} = k_0 exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (7)$$

Таким образом, можно зафиксировать расчетную величину энергии активации реакции, построив зависимость в координатах:

$$ln\frac{[A]_0}{[A]} \times \frac{1}{t} = f\left(-\frac{1}{T}\right)$$

Результаты и их обсуждение

Кинетика изменения углеводного профиля молока. ***Реализация алгоритма.*** При реализации алгоритма расчета интеграла X_R в соответствии с уравнением (5) получены кривые зависимости температуры от продолжительности воздействия для выбранных режимов при E_A = 150 кДж/моль (значение величины энергии активации выбрано для визуализации расчетного подхода и не характеризует какой-либо процесс изменения составных частей молока), а также соответствующие им подынтегральные функции (рис. 1). Вклад площади под участком на графике в величину X_R в значительной степени зависит от температуры в заданный момент времени, в связи с чем использован полулогарифмический масштаб значений по оси ординат (рис. 1b). Так, при режиме 1 (прямая УВТ-обработка) значение подынтегральной функции при температуре 140 °C составляет 1×10^{-19}, что на несколько порядков больше, чем при температуре 70 °C – 1×10^{-23}.

При работе с массивом данных, полученных из подобранных исследований, режим обработки, значения температуры и продолжительности изменяли в соответствии с применяемыми в источнике. Основными индикаторами теплового воздействия на молочную систему при рассмотрении углеводной составляющей принято считать формирование лактулозы, фурозина и гидроксиметилфурфурола (ГМФ). Перечисленные соединения образуются в молоке при нагревании без видимых органолептических изменений, поскольку являются начальными и промежуточными продуктами реакции Майяра (фурозин и ГМФ [30]), а также результатом пространственных изменений лактозы – перегруппировки Лобри де Брюйна-Альберта ван Экенштейна (лактулоза) [27]. Кроме того, определение данных маркеров в молоке является быстрым и доступным с точки зрения методик детектирования [30, 33]. В связи с этим математический алгоритм оценки кинетики формирования продуктов-индикаторов термического воздействия на молоко в настоящем исследовании

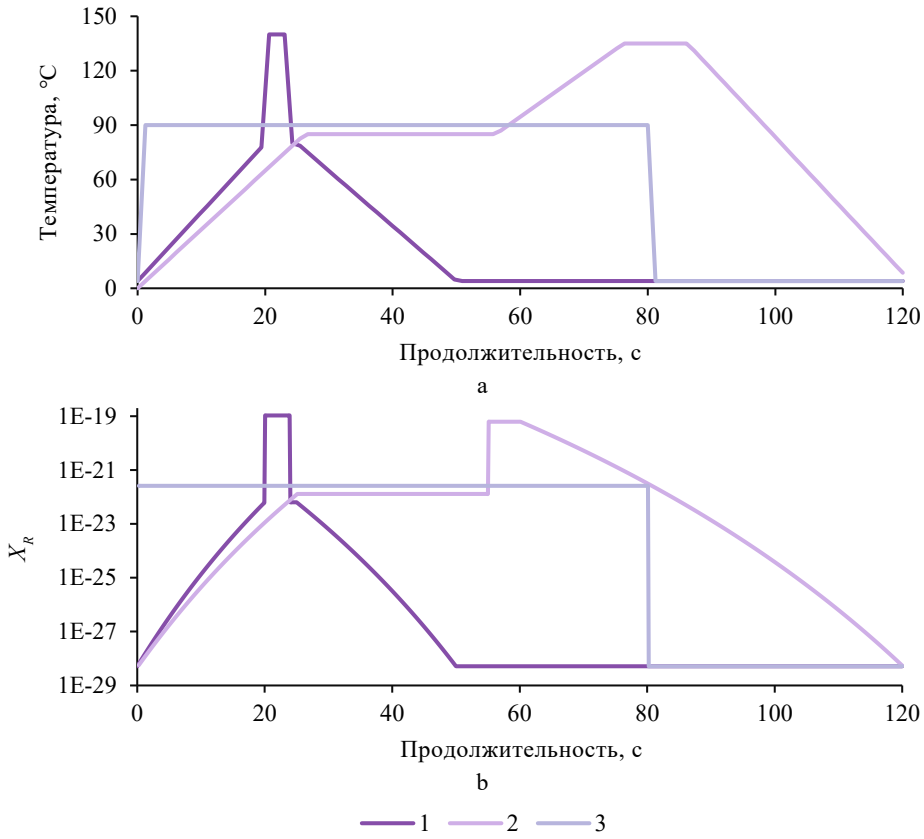


Рисунок 1. Зависимость температуры (a) и подынтегральной функции $exp\left(-E_A/RT(t)\right)$ (b) от продолжительности процесса при E_A = 150 кДж/моль (режимы: 1 – прямой УВТ; 2 – непрямой УВТ; 3 – модельный обобщенный режим)

Figure 1. Effect of time on temperature (a) and integrand function $exp\left(-E_A/RT(t)\right)$ (b) at E_A = 150 kJ/mol (modes: 1 – direct ultra-high temperature; 2 – indirect ultra-high temperature; 3 – generalized)

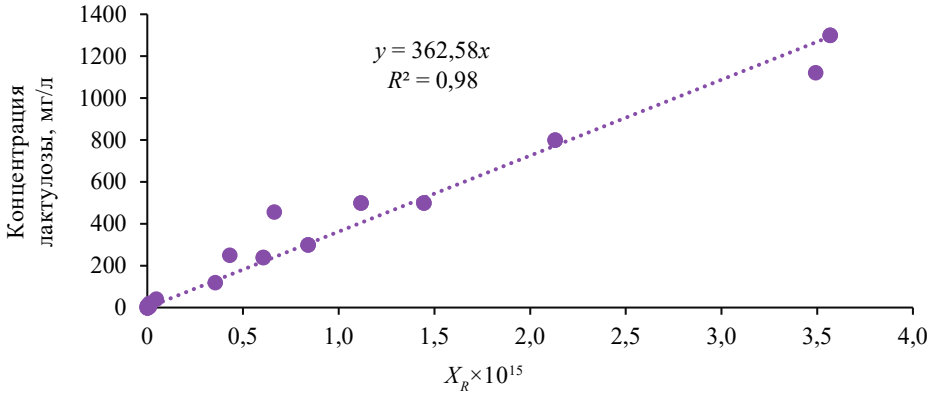


Рисунок 2. Зависимость концентрации лактулозы от $X_R = \int_0^t exp\left(-E_A/RT(t')\right)dt'$ при E_A = 130 кДж/моль

Figure 2. Effect of $X_R = \int_0^t exp\left(-E_A/RT(t')\right)dt'$ on lactulose concentration at E_A = 130 kJ/mol

применен к массивам экспериментальных данных об изменении концентраций лактулозы, гикроксиметилфурфурола и фурозина.

Оценку кинетики формирования лактулозы в молоке при разной термической нагрузке проводили на основе массива исследований [28, 34–37] после приведения значений к одной единице измерения концентрации, мг/л. Для реализации расчета выбран интервал значений энергии активации 70–160 кДж/моль с шагом 10 кДж/моль, обоснованный данными исследований [28, 29]. В результате применения предложенного подхода наибольшей достоверности ($R^2 \geq 0{,}95$) в координатах уравнения (5) удалось достичь при значении энергии активации 130 кДж/моль (рис. 2).

Предложенный метод расчета не подходит для оценки кинетики формирования лактулозы при длительной стерилизации молока (20 мин при 120 °C [34]), поскольку возникают значительные отклонения от линейности (рис. 3).

Вероятно, данный алгоритм подходит для оценки эффекта воздействия температуры на углеводный профиль молока в случаях незначительного формирования продуктов реакции Майяра. При длительной стерилизации в таре, как в исследовании [34], цвет продукта изменяется от белого к кремовому, что говорит о более глубоком протекании процесса, в сравнении с молоком, подвергнутым УВТ-обработке или пастеризации [38].

Оценка кинетики формирования гидроксиметилфурфурола в молоке. Для оценки кинетики накопления в молоке ГМФ использовали эмпирические данные [39–44]. Для визуализации кинетики формирования соединения в молоке в расчетах принимали интервал, представленный в исследованиях [28, 32]: 90–140 кДж/моль с шагом 10 кДж/моль. Однако наибольшей достоверности ($R^2 \geq 0{,}95$) (рис. 4) в координатах уравнения (5) соответствовало значение энергии активации, выходящее за рамки указанного интервала (85 кДж/моль).

Для проанализированного массива данных не выделено исследований, в которых значения концентрации ГМФ в молоке после тепловой обработки имели нелинейный характер, как это было определено для лактулозы. Вероятно, процесс накопления ГМФ отличается большей предсказуемостью, а его кинетика – лучшей согласованностью с используемой моделью, что делает возможной более точную математическую оценку.

Оценка кинетики формирования фурозина в молоке. Для математического моделирования использовали эмпирические данные из источников [28, 33, 35, 45, 46]. Значения энергии активации принимали в диапазоне 85–105 кДж/моль [28]. Однако при оценке накопления фурозина математическое описание экспериментальных данных, дающее наибольшую достоверность

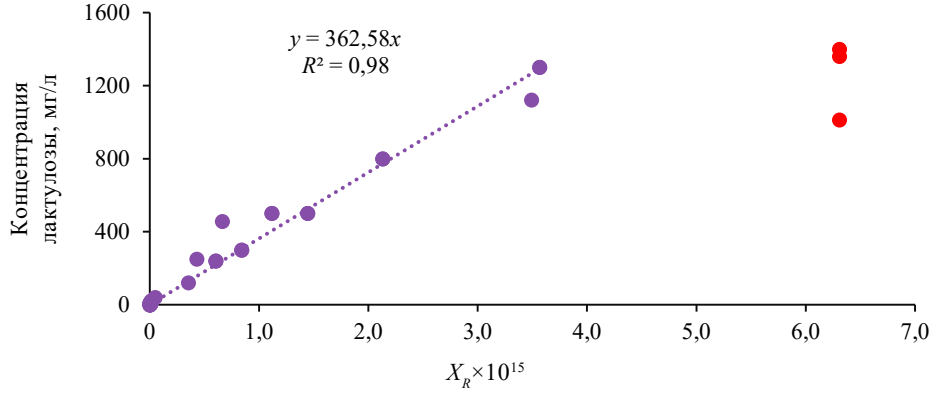


Рисунок 3. Отклонения от полученного тренда: фиолетовые точки – массив данных [28, 35–37]; красные точки – длительная стерилизация [34]

Figure 3. Deviations from the trend: Data array (purple dots) [28, 35–37]; long-term sterilization (red dots) [34]

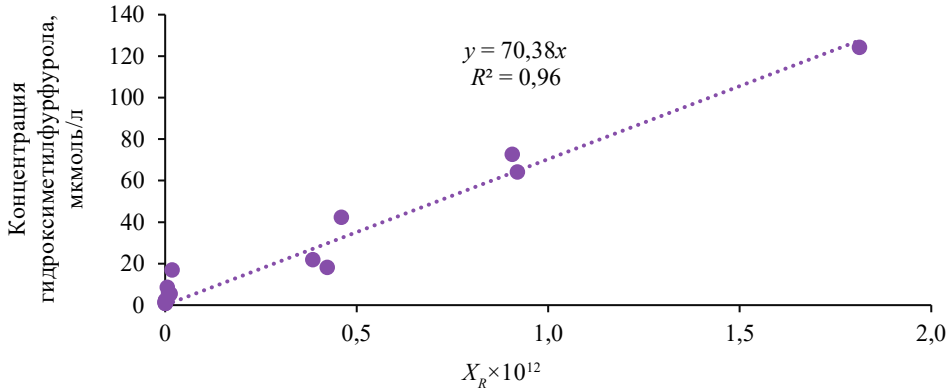


Рисунок 4. Зависимость концентрации гидроксиметилфурфурола от $X_R = \int_0^t exp\left(-E_A/RT\left(t'\right)\right)dt'$ при E_A = 85 кДж/моль

Figure 4. Effect of $X_R = \int_0^t exp\left(-E_A/RT\left(t'\right)\right)dt'$ on hydroxymethylfurfural concentration at E_A = 85 kJ/mol

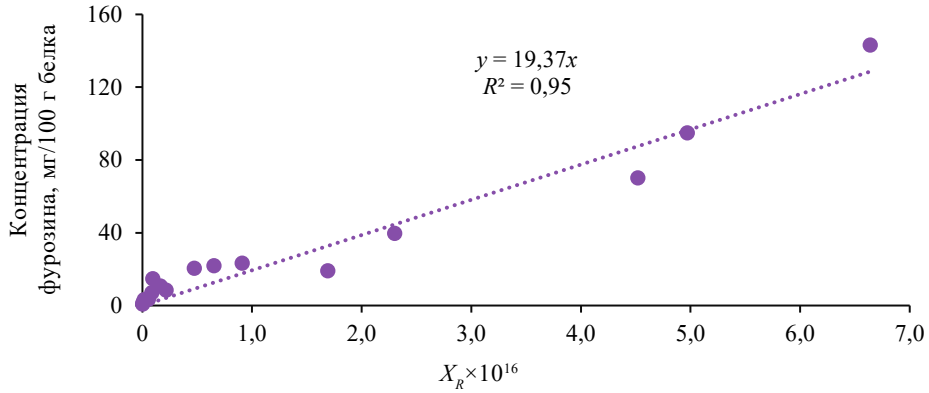


Рисунок 5. Зависимость концентрации фурозина от $X_R = \int_0^t exp\left(-E_A/RT\left(t'\right)\right)dt'$ при E_A = 130 кДж/моль

Figure 5. Effect of $X_R = \int_0^t exp\left(-E_A/RT\left(t'\right)\right)dt'$ on furosine concentration at E_A = 130 kJ/mol

Таблица 1. Значения энергий активации формирования в молоке продуктов изменения углеводного профиля

Table 1. Energy values that trigger the development of carbohydrate-changing products in milk

Процесс	E_A, кДж/моль		Q_{10}	
	Оценено в данной работе	Справочное значение	60–70 °C	90–100 °C
Образование лактулозы	130	74–153 [28], 150 [29]	3,9	3,2
Образование гидроксиметилфурфурола	85	90–135 [28], 139 [32]	2,4	2,1
Образование фурозина	130	86,2–104,1 [28]	3,9	3,2

($R^2 \geq 0{,}95$) в координатах уравнения (5), получено при большем значении энергии активации, соответствующем 130 кДж/моль (рис. 5).

При анализе эмпирических данных из подобранных источников выявлены линейные зависимости концентрации фурозина от температурной нагрузки. Отсутствие существенных отклонений подтверждает валидность предложенного метода для оценки кинетики его накопления в молоке.

Таким образом, предлагаемый в настоящем исследовании подход к оценке кинетики формирования продуктов изменения углеводного профиля позволяет определить концентрации лактулозы, ГМФ и фурозина в зависимости от уровня термической нагрузки на молоко на этапе его переработки в сухие консервы. Результаты проведенных расчетов позволили определить значения энергий активации реакций образования лактулозы, ГМФ и фурозина (табл. 1), которые помогают получить наибольшую достоверность ($R^2 \geq 0{,}95$) экспериментальных данных в координатах уравнения (5).

Литературные данные содержат отличные друг от друга значения энергий активации рассматриваемых процессов, что может быть связано как с различной методологией исследований, так и со свойствами изучаемой системы. Кроме того, значения показателя, полученные ранее в исследованиях [1–2, 14], отличаются от полученных авторами для ГМФ (85 кДж/моль) и фурозина (130 кДж/моль). Вероятно, это обосновано влиянием ряда факторов, таких как сырье (состав, значение активной кислотности и др.), соблюдение технологических режимов при его обработке, скорость нагрева и охлаждение молока [30].

В качестве метрики, описывающей скорость реакции в заданном температурном интервале, использовалась величина Q_{10}, численно равная отношению скоростей реакции при температурах T_1 и $T_2 = T_1 + 10$, т. е. описывающая во сколько раз возрастает скорость реакции при увеличении температуры на 10 K:

$$Q_{10} = \frac{k_2\left(T_2\right)}{k_1\left(T_1\right)} \quad (8)$$

Согласно уравнению (4), соотношение констант скорости реакции при температурах T_2 и T_1, $T_2 > T_1$ описывается выражением (9):

$$\frac{k_2}{k_1} = exp\left(\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right) \quad (9)$$

Логарифмируя обе части уравнения, получим (10):

$$ln\frac{k_2}{k_1} = \frac{E_A}{R}\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1}\right) \quad (10)$$

Следовательно полагаем, что $T_2 - T_1 = 10$ K и, исходя из определения (8), получим уравнение (11):

$$lnQ_{10} = \frac{E_A}{R}\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} = \frac{E_A}{R}\frac{10}{T_1 T_2} \quad (11)$$

В рамках данной работы значения Q_{10} получены для процессов формирования лактулозы, ГМФ и фурозина в молоке для интервалов температуры 60–70 и 90–100 °С. Так, предложенный в настоящей работе метод позволяет получить зависимости концентрации различных продуктов термической обработки молока от тепловой нагрузки с хорошей линейностью. Используемый для расчета подход также позволяет косвенно оценить энергию активации процесса.

Кинетика денатурации белков. Изменения белковой структуры, которые происходят в молочной системе в процессе производства сухих консервов, зависят от глубины температурного воздействия на сырье [47–49]. Поскольку сывороточные белки (главным образом α-лактальбумин и β-лактоглобулин) молока являются наименее термостойкими, в сравнении с казеином [50–53], в исследовании представляла интерес оценка их изменения при термической обработке. В качестве источников данных о термической денатурации сывороточных белков при расчетах применяли результаты исследований авторов работ [35, 41, 46, 54, 55]. Литературные данные находятся в интервале температур нагрева 65–140 °С. Результаты для β-лактоглобулина приведены на рисунке 6.

В случае оценки степени денатурации α-лактальбумина полученная зависимость для данных из работы [55] отличается от зависимости, полученной для общего массива из других источников (рис. 7). Значения энергии активации близки в обоих случаях, и различия в зависимостях связаны с различием в предэкспоненциальном множителе.

Из полученных графиков можно рассчитать энергии активации и значение Q_{10} в интервале температур 60–70 и 90–100 °С процессов термической денатурации белков (табл. 2).

Энергия активации для процесса денатурации β-лактоглобулина (72,1 кДж/моль) меньше, чем для α-лактальбумина (85,1–85,7 кДж/моль), что соответствует исследованию [32]. Расчетные величины позволяют сделать вывод о большей подверженности β-лактоглобулина воздействию температуры, чем α-лактальбумина. Несмотря на то что температура денатура-

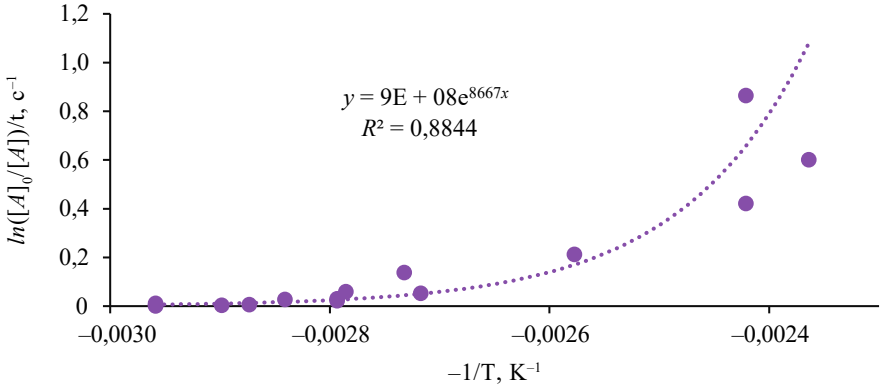


Рисунок 6. Зависимость в координатах уравнения (7) для β-лактоглобулина

Figure 6. Coordinate dependence in Equation (7) for β-lactoglobulin

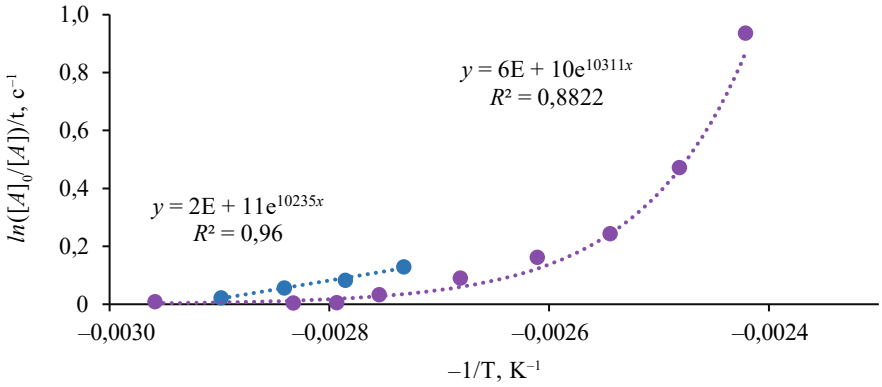


Рисунок 7. Зависимость в координатах уравнения (7) для α-лактальбумина по данным [55] (голубой) и [41, 46] (фиолетовый)

Figure 7. Coordinate dependence in Equation (7) for α-lactalbumin: [55] (blue), [41, 46] (purple)

Таблица 2. Энергии активации термоденатурации сывороточных белков

Table 2. Energies that trigger thermal denaturation of whey proteins

Белок	$\frac{E_A}{R}$, K	Энергия активации, кДж/моль	R^2 зависимости в координатах (7)	Средняя энергия активации, кДж/моль	Q_{10}	
					60–70 °C	90–100 °C
β-лактоглобулин	8667	72,1	0,88	72,1	2,1	1,9
α-лактальбумин [40, 45]	10311	85,7	0,88	85,4	2,5	2,1
α-лактальбумин [53]	10235	85,1	0,96			

ции α-лактальбумина ниже, чем у β-лактоглобулина (~62–68 и 75–85 °C соответственно) [56], меньшее значение энергии активации для второго, предположительно, может быть связано с наличием свободной тиольной группы в его молекуле, инициирующей более быстрое взаимодействие белка с другими белками молока и его агрегацию [57].

Выводы

Предложен математический подход к оценке кинетики формирования маркеров изменения углеводного и белкового профилей молока при температурной обработке, позволяющий количественно интерпретировать термическую нагрузку на систему и получить достоверные зависимости их концентрации от температуры и продолжительности процесса термообработки ($R^2 \geq 0{,}88$). Получены зависимости между интегральной термической нагрузкой на систему и концентрацией лактулозы, гидроксиметилфурфурола и фурозина, обладающие высокой достоверностью. Выявлено, что длительная стерилизация молока в таре (120 °C в течение 20 мин) нарушает линейность кинетики формирования лактулозы в молоке, что указывает на более глубокое протекание реакции меланоидинообразования. Для процессов образования продуктов изменения углеводного профиля молока получены значения энергии активации, соответствующие наибольшей достоверности: 130 кДж/моль (для лактулозы), 85 кДж/моль (для ГМФ) и 130 кДж/моль (для фурозина).

Оценка кинетики денатурации белков молока показала, что β-лактоглобулин больше подвержен денатурации, чем α-лактальбумин, несмотря на большую термостабильность. Рассчитаны значения интервалов энергий активации процесса денатурации: 72,1 кДж/моль (для β-лактоглобулина) и 85,1–85,7 кДж/моль (для α-лактальбумина). Полученные результаты демонстрируют возможность количественной оценки тепловой нагрузки на молочную систему с использованием математической модели. Таким образом, предложенный метод представляет научную основу для создания системы оценки термической обработки молока, но требует дополнительных исследований для масштабирования и реализации на практике, что является целью нашей последующей работы. Разработанный подход в дальнейшем может применяться в пищевой промышленности для контроля качества и прогнозирования свойств сухого молока в хранении на основе режимов его термической обработки.

Критерии авторства

И. А. Барковская, В. Ю. Ярышев, В. Г. Блиадзе – разработка концепции и дизайна исследования, сбор, анализ и интерпретация данных и материалов, подготовка и редактирование текста статьи; С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова, В. В. Кондратенко – подготовка статьи к публикации; А. Г. Галстян – разработка концепции и дизайна исследования, редактирование текста. 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

I.A. Barkovskaya, V.Yu. Yaryshev, and V.G. Bliadze developed the concept, designed the research, collected and analyzed the data, and drafted and proofread the manuscript; S.N. Turovskaya, E.E. Illarionova, and V.V. Kondratenko prepared the manuscript for publication; A.G. Galstyan developed the concept, designed the research, and proofread the text. All co-authors agreed and approved of the final version and are equally responsible for its integrity, reliability, and any potential plagiarism.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Rosa E, Prudencio ES. A comprehensive approach about comparison between drying technologies and powdered dairy products. Food Research International. 2023;173(Part 1):113326. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113326

2. Kourkouta L, Frantzana A, Koukourikos K, Iliadis C, Papathanasiou IV, *et al*. Milk nutritional composition and its role in human health. Journal of Pharmacy and Pharmacology. 2021;9(1):10–15. https://doi.org/10.17265/2328-2150/2021.01.002

3. McCarthy NA, Magan JB, Kelleher CM, Kelly AL, O'Mahony JA, *et al*. Heat treatment of milk: Effect on concentrate viscosity, powder manufacture and end-product functionality. International Dairy Journal. 2022;128:105289. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105289

4. Song X, Shen S, Dong G, Ding H, Xie Z, *et al*. A comprehensive review of direct, indirect, and AI-based detection methods for milk powder. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2025;9:1571317. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1571317

5. Ryabova AE, Semipyatnyi VK, Galstyan AG. Effects of storage conditions on milk powder properties. Journal of Dairy Science. 2023;106(10):6741–6758. https://doi.org/10.3168/jds.2022-23094

6. Ding Y, Han F, Xie Z, Li G, Zhuang Y, *et al*. Dairy fortification as a good option for dietary nutrition status improvement of 676 preschool children in China: A simulation study based on a cross-sectional diet survey (2018–2019). Frontiers in Nutrition. 2022;9:1081495. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1081495

7. Hamed AM, Galli B, Hogan SA, Abdel-Hamid M, Romeih E. Adaptive and predictive approaches to mitigate the impact of milk seasonality on composition, processing technologies and quality of milk powders. International Journal of Dairy Technology. 2025;78(1):e13148. https://doi.org/10.1111/1471-0307.13148

8. Qin Y, Pillidge C, Harrison B, Adhikari B. Pathways in formulating foods for the elderly. Food Research International. 2024;186:114324. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114324

9. Zanini B, Simonetto A, Zubani M, Castellano M, Gilioli G. The effects of cow-milk protein supplementation in elderly population: Systematic review and narrative synthesis. Nutrients. 2020;12(9):2548. https://doi.org/10.3390/nu12092548

10. Schons PF, Colet R, Pinto SS, Verruck S. Powdered milk. In: da Cruz AG, Pimentel TC, Esmerino EA, Verruck S, editors. Dairy Foods Processing. NY: Springer US; 2024. pp. 179–192. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-4144-6_13

11. Рябова А. Е. Влияние условий хранения на качество сухого молока. Молочная промышленность. 2021. № 7. С. 56–57. [Ryabova AE. Influence of storage conditions on the quality of powder milk. Dairy industry. 2021;(7):56–57. (In Russ.)] https://doi.org/10.31515/1019-8946-2021-07-56-57

12. Duan J, Gao S, Diao Y, Zhang Q, Gu Y, *et al*. Effects of heat treatment on liquid milk quality and safety: Nutritional changes, hazardous substances and control strategies. Food Control. 2025;176:111377. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111377

13. Рязанцева К. А., Шерстнева Н. Е. Традиционные и инновационные способы применения ультрафиолетового излучения в молочной промышленности. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 2. С. 390–406. [Riazantseva KA, Sherstneva NE. Traditional and innovative uses of ultraviolet treatment in the dairy industry. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(2):390–406. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372

14. Bista A, Murphy EG, O'Donnell CP, O'Shea N. The effect of heat treatment on physicochemical properties of skim milk concentrate and spray-dried skim milk powder. International Journal of Dairy Technology. 2022;75(3):690–700. https://doi.org/10.1111/1471-0307.12876

15. Алькадур М. И., Пряничникова Н. С., Юрова Е. А., Петров А. Н. Влияние термической обработки и пастеризации на качество сухого молока. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 2. С. 275–284. [Alkadour MI, Pryanichnikova NS, Yurova EA, Petrov AN. Effect of thermal treatment and pasteurization on milk powder quality. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(2):275–284. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2506

16. Акадур М. И., Петров А. Н., Пряничникова Н. С. Влияние класса термической обработки сухого молока на структуру и свойства ферментированного сгустка. Пищевая промышленность. 2024. № 11. С. 82–89. [Alkadour MI, Petrov AN, Pryanichnikova NS. Influence of the class of thermal treatment of dry milk on the structure and properties of the fermented curd. Food industry. 2024;(11):82–89. (In Russ.)] https://doi.org/10.52653/PPI.2024.11.11.015

17. Калугина Д. Н., Юрова Е. А. Обоснование определения индекса азота сывороточного белка для оценки белкового состава сухого молока. Молочная промышленность. 2022. № 7. С. 35–37. [Kalugina DN, Yurova EA. Rationale for determining the nitrogen index of whey protein to assess the protein composition of milk powder. Dairy industry. 2022;(7):35–37. (In Russ.)] https://doi.org/10.31515/1019-8946-2022-07-35-37

18. Мельденберг Д. Н., Полякова О. С., Семёнова Е. С., Юрова Е. А. Разработка комплексной оценки белкового состава молока сырья различных сельскохозяйственных животных для выработки продуктов функциональной направленности. Хранение и переработка сельхозсырья. 2020. № 3. С. 118–133. [Meldenberg DN, Polyakova OS, Semenova ES, Yurova EA. Development of a comprehensive milk protein composition assessment from raw materials of various farm animals for the functional products production. Storage and Processing of Farm Products. 2020;(3):118–133. (In Russ.)] https://doi.org/10.36107/spfp.2020.352

19. Paul A, Martin F, Simard B, Scher J, Gaiani C, *et al*. Deciphering the segregation of proteins in high-protein dairy powders after spray-drying. Journal of Dairy Science. 2023;106(2):843–851. https://doi.org/10.3168/jds.2022-22133

20. Рябова А. Е., Кондратенко В. В. Моделирование процесса самопрессования сухого молока в процессе хранения. Пищевая промышленность. 2024. № 9. С. 65–69. [Ryabova AE, Kondratenko VV. Modeling of the self-pressing process of powdered milk during storage. Food industry. 2024;(9):65–69 (In Russ.)] https://doi.org/10.52653/PPI.2024.9.9.013

21. Fan X, Wang C, Cheng M, Wei H, Gao X, *et al*. Markers and mechanisms of deterioration reactions in dairy products. Food Engineering Reviews. 2023;15:230–241. https://doi.org/10.1007/s12393-023-09331-9

22. Mahmood N, Muhoza B, Huang Y, Munir Z, Zhang Y, *et al*. Effects of emerging food pretreatment and drying techniques on protein structures, functional and nutritional properties: An updated review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024;64(26):9365–9381. https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2212302

23. Rauh V, Xiao Y. The shelf life of heat-treated dairy products. International Dairy Journal. 2022;125:105235. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105235

24. Clarke HJ, McCarthy WP, O'Sullivan MG, Kerry JP, Kilcawley KN. Oxidative quality of dairy powders: Influencing factors and analysis. Foods. 2021;10(10):2315. https://doi.org/10.3390/foods10102315

25. Lu J, Zhu T, Dai Y, Xing L, Jinqi L, *et al*. The effect of heat treatment on the lactosylation of milk proteins. Journal of Dairy Science. 2023;106(12):8321–8330. https://doi.org/10.3168/jds.2023-23526

26. Li Y, Quan W, Jia X, He Z, Wang Z, *et al*. Profiles of initial, intermediate, and advanced stages of harmful Maillard reaction products in whole-milk powders pre-treated with different heat loads during 18 months of storage. Food Chemistry. 2021;351:129361. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129361

27. Dong L, Yu Z, Zhao R, Peng B, Zhang Y, *et al*. The effect of lactulose thermal degradation products on *β*-lactoglobulin: Linear-, loop-, and cross-link structural modifications and reduced digestibility. Food Chemistry. 2023;403:134333. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134333

28. Claeys WL, Ludikhuyze LR, Hendrickx ME. Formation kinetics of hydroxymethylfurfural, lactulose and furosine in milk heated under isothermal and non-isothermal conditions. Journal of Dairy Research. 2001;68(2):287–301. https://doi.org/10.1017/s0022029901004745

29. Andrews GR. Determining the energy of activation for the formation of lactulose in heated milks. Journal of Dairy Research. 1985;52(2):275–280. https://doi.org/10.1017/S0022029900024146

30. Wang Y, Xiao R, Liu S, Wang P, Zhu Y, *et al*. The impact of thermal treatment intensity on proteins, fatty acids, macro/micro-nutrients, flavor, and heating markers of milk—A comprehensive review. International Journal of Molecular Sciences. 2024;25(16):8670. https://doi.org/10.3390/ijms25168670

31. Abdulhameed AF, Memon QA. An improved trapezoidal rule for numerical integration. Journal of Physics: Conference Series. 2021;2090(1):012104. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2090/1/012104

32. Kessler HG. Food and bio process engineering. In: Kessler VA. Dairy Technology. 2002. 694 p.

33. Li M, Shen M, Lu J, Yang J, Huang Y, *et al*. Maillard reaction harmful products in dairy products: Formation, occurrence, analysis, and mitigation strategies. Food Research International. 2022;151:110839. https://elibrary.ru/UGUAWT

34. Calvo MM, Olano A. Formation of galactose during heat treatment of milk and model systems. Journal of Dairy Research. 1989;56(5):737–740. https://doi.org/10.1017/S0022029900029307

35. Lan XY, Wang JQ, Bu DP, Shen JS, Zheng N, *et al*. Effects of heating temperatures and addition of reconstituted milk on the heat indicators in milk. Journal of Food Science. 2010;75(8):C653–C658. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01802.x

36. Marconi E, Messia MC, Amine A, Moscone D, Vernazza F, *et al*. Heat-treated milk differentiation by a sensitive lactulose assay. Food Chemistry. 2004;84(3):447–450. https://doi.org/10.1016/s0308-8146(03)00268-1

37. Olano A, Calvo MM. Kinetics of lactulose, galactose and epilactose formation during heat-treatment of milk. Food Chemistry. 1989;34(4):239–248. https://doi.org/10.1016/0308-8146(89)90101-5

38. Топникова Е. В., Мягконосов Д. С., Абрамов Д. В., Кашникова О. Г. Колориметрический метод оценки интенсивности тепловой нагрузки при пастеризации молока. Пищевые системы. 2024. Т. 7. № 3. С. 481–490. [Topnikova EV, Myagkonosov DS, Abramov DV, Kashnikova OG. Colorimetric method for estimating the intensity of heat load during milk pasteurization. Food Systems. 2024;7(3):481–490. (In Russ.)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-481-490

39. Chen Z, Yan X. Simultaneous determination of melamine and 5-hydroxymethylfurfural in milk by capillary electrophoresis with diode array detection. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2009;57(19):8742–8747. https://doi.org/10.1021/jf9021916

40. Morales FJ, Jiménez-Pérez S. HMF formation during heat-treatment of milk-type products as related to milkfat content. Journal of Food Science. 1999;64(5):855–859. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.199+9.tb15927.x

41. Morales FJ, Romero C, Jiménez-Pérez S. Characterization of industrial processed milk by analysis of heat-induced changes. International Journal of Food Science and Technology. 2000;35(2):193–200. https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2000.00334.x

42. Morales FJ, Romero C, Jiménez-Pérez S. Chromatographic determination of bound hydroxymethylfurfural as an index of milk protein glycosylation. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 1997;45(5):1570–1573. https://doi.org/10.1021/jf960930v

43. Morales FJ, Romero C, Jiménez-Pérez S. Evaluation of heat-induced changes in Spanish commercial milk: Hydroxymethylfurfural and available lysine content. International Journal of Food Science and Technology. 2003;31(5):411–418. https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.1996.00357.x

44. Xing Q, Fu X, Liu Z, Cao Q, You C, *et al*. Contents and evolution of potential furfural compounds in milk-based formula, ultra-high temperature milk and pasteurised yoghurt. International Dairy Journal. 2021;120:105086. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105086

45. Birlouez-Aragon I, Sabat P, Gouti N. A new method for discriminating milk heat treatment. International Dairy Journal. 2002;12(1):59–67. https://doi.org/10.1016/S0958-6946(01)00131-5

46. Sakkas L, Moutafi A, Moschopoulou E, Moatsou G. Assessment of heat treatment of various types of milk. Food Chemistry. 2014;159:293–301. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.020

47. Алкадур М. И., Илларионова Е. Е. Влияние класса термообработки сухого молока на переход белка в сыворотку. Пищевая промышленность. 2025. № 3. С. 96–99. [Alkadour MI, Illarionova EE. Effect of heat treatment class of dry milk on protein transfer to whey. Food industry. 2025;(3):96–99. (In Russ.)] https://doi.org/10.52653/PPI.2025.3.3.018

48. Рязанцева К. А., Шерстнева Н. Е., Агаркова Е. Ю., Жижин Н. А. Влияние модифицированных ультрафиолетом сывороточных белков на стабильность кисломолочного сгустка. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2023. Т. 392. № 2–3. С. 83–92. [Ryazantseva KA, Sherstneva NE, Agarkova EYu, Zhizhin NA. Influence of ultraviolet modified whey proteins on the stability of the stability of the stabilized milk cloud. Izvestiya vuzov. Food technology. 2023;392(2–3):83–92. (In Russ.)] https://doi.org/10.26297/0579-3009.2023.2-3.14

49. Калугина Д. Н., Юрова Е. А. Характеристики белкового состава в формировании сроков годности молока ультрапастеризованного. Вестник КрасГАУ. 2021. № 10. С. 165–172. [Kalugina DN, Yurova EA. The protein composition characteristics in the formation of ultra pasteurized milk shelf life. Bulletin of KSAU. 2021;(10):165–172. (In Russ.)] https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-10-165-172

50. Wu J, Chen S, Van der Meeren P. Heat stability assessment of milk: A review of traditional and innovative methods. Foods. 2024;13(14):2236. https://doi.org/10.3390/foods13142236

51. Wu Y, Wu S, Sun M, Nie L, Zhang Y, *et al*. Reduction of the levels of 5-hydroxymethylfurfural and advanced glycation end products in milk by the combination of high pressure and moderate heat pre-incubation. European Food Research and Technology. 2023;249:923–937. https://doi.org/10.1007/s00217-022-04184-8

52. Zhang Y, Yi S, Lu J, Pang X, Xu X, *et al*. Effect of different heat treatments on the Maillard reaction products, volatile compounds and glycation level of milk. International Dairy Journal. 2021;123:105182. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105182

53. Большакова Е. И., Стрижко М. Н. Влияние белкового профиля на технологические свойства молочных консервов с сахаром. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2023. Т. 391. № 1. С. 107–113. [Bolshakova EI, Strizhko MN. Influence of the protein profile on the technological properties of canned milk with sugar. Izvestiya vuzov. Food technology. 2023;391(1):107–113. (In Russ.)] https://doi.org/10.26297/0579-3009.2023.1.17

54. Mayer HK, Raba B, Meier J, Schmid A. RP-HPLC analysis of furosine and acid-soluble *β*-lactoglobulin to assess the heat load of extended shelf life milk samples in Austria. Dairy Science & Technology. 2010;90(4):413–428. https://doi.org/10.1051/dst/2009058

55. Гралевская И. В., Ионова Л. В., Хавров И. В., Барсукова Л. С. Мониторинг технологических особенностей мягких кислотно-сычужных сыров. Техника и технология пищевых производств. 2012. Т. 25. № 2. [Gralevskaya IV, Ionova LV, Havrov IV, Barsukova LS. Monitoring of technological characteristics of soft acid-rennet cheese. Food Processing: Techniques and Technology. 2012;25(2). (In Russ.)]

56. Рязанцева К. А., Шерстнева Н. Е. Подходы к повышению термической стабильности сывороточных белков. Пищевая промышленность. 2021. № 8. С. 25–28. [Riazantseva KA, Sherstneva NE. Approaches to increasing the heat stability of whey proteins. Food industry. 2021;(8):25–28. (In Russ.)] https://doi.org/10.52653/PPI.2021.8.8.006

57. Čurlej J, Zajác P, Čapla J, Golian J, Benešová L, *et al*. The effect of heat treatment on cow's milk protein profiles. Foods. 2022;11(7):1023. https://doi.org/10.3390/foods11071023

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Барковская Ирина Александровна / Irina A. Barkovskaya ORCID 0000-0003-4779-1076; eLIBRARY SPIN 9404-4365
Ярышев Владислав Юрьевич / Vladislav Yu. Yaryshev ORCID 00009-0007-7848-4606; eLIBRARY SPIN 4906-1980
Блиадзе Владимир Геннадьевич / Vladimir G. Bliadze ORCID 0000-0001-9300-3267; eLIBRARY SPIN 7263-6500
Туровская Светлана Николаевна / Svetlana N. Turovskaya ORCID 0000-0002-5875-9875; eLIBRARY SPIN 6904-5308
Илларионова Елена Евгеньевна / Elena E. Illarionova ORCID 0000-0002-9399-0984; eLIBRARY SPIN 2990-2390
Кондратенко Владимир Владимирович / Vladimir V. Kondratenko ORCID 0000-0002-0913-5644; eLIBRARY SPIN 3383-1774
Галстян Арам Генрихович / Aram G. Galstyan ORCID 0000-0002-0786-2055; eLIBRARY SPIN 9355-5603

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2608
https://elibrary.ru/QMIXBQ

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Влияние ультразвукового воздействия на структурные и антимикробные свойства полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином

И. Ю. Васильев*, В. А. Род, О. А. Савельева

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 23.06.2025
Принята после рецензирования: 18.09.2025
Принята к публикации: 07.10.2025

**e-mail: iljanaras@ya.ru*
© И. Ю. Васильев, В. А. Род, О. А. Савельева, 2025

Аннотация.
Ограниченный срок хранения пищевых продуктов является одной из основных проблем в пищевой отрасли. Увеличивается актуальность применения активной упаковки, содержащей антимикробные добавки, пролонгирующие срок хранения продуктов. Цель исследования – изучить влияние воздействия ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей на основе термопластичных полиолефинов (полиэтилен, полипропилен), дисперсно-наполненных бетулином, а также их рецептурно-технологических параметров на структурные и антимикробные свойства.
Объекты исследования – пленки на основе полиолефинов (полиэтилен и полипропилен), а также полимерные композиции на основе полиолефинов и бетулина, расплавы которых при отливе модифицировали воздействием ультразвуковых колебаний, используя плоскощелевой экструдер (МашПласт, Россия). Для вышеуказанных объектов определяли структурно-морфологические свойства на сканирующем электронном микроскопе JSM-7500F (JEOL, Япония), теплофизические свойства – на калориметре DSC 204 F1 (NETZSCH, Germany). Химический состав изучали методом ИК-спектроскопии на приборе ФСМ-1201 (Инфраспек, Россия) с приставкой НПВО. Деформационно-прочностные свойства – на разрывной машине Z010 (ZwickRoell, Германия). Определение антимикробных свойств – диско-диффузионным методом в соответствии с руководством МУК 4.2.1890-04.
Воздействие ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей эффективно при содержании бетулина в смесях с полиолефинами выше 6 мас. %. Данный процесс позволяет направленно диспергировать агломерированные частицы бетулина, минимизируя их размер, и получать более гомогенное его распределение в смесях с полиолефинами при их отливе в полимерные композиции. Модификация расплавов полимерных композиций воздействием ультразвуковых колебаний оказывала влияние на меньшее снижение деформационно-прочностных свойств, в сравнении с полимерными композициями, для которых ультразвук не применяли. Это обусловлено увеличением межфазного взаимодействия между полиолефинами и бетулином в результате образования функциональных групп с полярной структурой (карбоксильные и карбонильные) при их обработке. При этом воздействие ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных композиций не влияло на температурные режимы их переработки и в значительной степени не снижало производительность экструзионного оборудования, что является как эргономически, так и экономически эффективным.
Подтвержден положительный результат антимикробного воздействия полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, расплавы которых подвергали воздействию ультразвуковых колебаний: коэффициент ингибирования роста в отношении тест-микроорганизмов, в сравнении с исходными полимерными композициями, увеличился в 1,5 раза; для полимерных композиций на основе полипропилена – выше, чем для полиэтиленовых, что обусловлено химической структурой исходных полиолефинов. Данный коэффициент также позволяет ингибировать репродуцирование тест-микроорганизмов в отношении *Candida albicans*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, однако ингибирование репродуцирования для *Escherichia coli* не наблюдалось. Для данной группы тест-микроорганизмов бетулин в качестве модифицирующей добавки с функцией антимикробности не подходит. Таким образом, модификация расплавов полимерных композиций на основе полиолефинов в смесях с бетулином при воздействии ультразвуковых колебаний является актуальным направлением для создания активных пленочных материалов.

Ключевые слова. Полиэтилен, полипропилен, ультразвуковое воздействие, полимерные композиции, бетулин, антимикробные свойства, экструзия, тест-микроорганизмы

Для цитирования: Васильев И. Ю., Род В. А., Савельева О. А. Влияние ультразвукового воздействия на структурные и антимикробные свойства полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 807–818. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2608

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2608
https://elibrary.ru/QMIXBQ

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

Effect of Ultrasonication on Structural and Antimicrobial Properties of Polymer Compositions Based on Polyolefins Dispersed with Betulin

Ilya Yu. Vasilyev*, Viktor A. Rod, Olga A. Saveleva

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Received: 23.06.2025
Revised: 18.09.2025
Accepted: 07.10.2025

**e-mail: iljanaras@ya.ru*

© I.Yu. Vasilyev, V.A. Rod, O.A. Saveleva, 2025

Abstract.
Food products have a limited shelf life, which remains a major challenge for the food industry. Active packaging with antimicrobial additives extends shelf life and prevents spoilage. This research tested two hypotheses: 1) ultrasonic treatment affects polymer blends based on thermoplastic polyolefins (polyethylene, polypropylene) dispersed with botulin; 2) their structural and antimicrobial properties depend on the formulation and processing parameters.

The study featured polyolefin-based films (polyethylene and polypropylene), as well as polymer composites based on polyolefins and betulin. The melts of these composites were ultrasonicated during casting using a flat-die extruder (MashPlast, Russia). The structural and morphological properties of these composites were determined using a JSM-7500F scanning electron microscope (JEOL, Japan); their thermophysical properties were tested using a DSC 204 F1 calorimeter (NETZSCH, Germany). The chemical investigation relied on IR spectroscopy in an FSM-1201 device (Infraspek, Russia) with an NTR attachment. The strain and strength properties were measured on a Z010 tensile tester (ZwickRoell, Germany). The antimicrobial experiment involved the disk diffusion method.

Ultrasonic vibrations were effective when the betulin content in the polyolefin blends exceeded 6 wt.%. This process provided targeted dispersion of agglomerated betulin particles od minimal size. It resulted in a homogeneous distribution of polyolefin blends during polymerization. The ultrasonic treatment slowed down the decline in strain and strength properties. The increased interfacial interaction between the polyolefins and betulin was due to the development of polar functional carboxyl and carbonyl groups during processing. Ultrasonication affected neither processing temperatures nor extrusion performance, which makes the method ergonomical and cost-effective.

This research confirmed the positive antimicrobial effect of ultrasonicated polymer composites based on polyolefins dispersed with botulin. The growth inhibition coefficient for test microorganisms increased by 1.5 times, compared to the original polymer composites. For the polypropylene-based polymer composites, it was higher than for polyethylene-based ones. This phenomenon could be explained by the chemical structure of the original polyolefins. This coefficient also inhibited *Candida albicans*, *Staphylococcus aureus*, and *Pseudomonas aeruginosa*. However, it failed to inhibit *Escherichia coli*, rendering betulin unsuitable as an antimicrobial additive for this group of microorganisms.

In general, the ultrasonic modification of polyolefin-based polymer composites blended with betulin showed good prospects as a component in new active food films.

Keywords. Polyethylene, polypropylene, ultrasonic exposure, polymer compositions, betulin, antimicrobial properties, extrusion, test microorganisms

For citation: Vasilyev IYu, Rod VA, Saveleva OA. Effect of Ultrasonication on Structural and Antimicrobial Properties of Polymer Compositions Based on Polyolefins Dispersed with Betulin. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):807–818. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2608

Введение

Полимерные материалы являются неотъемлемой частью упаковочной индустрии. Из общего количества производимых полимерных материалов значительная их часть (45 %) используется в упаковочной отрасли для изготовления изделий из пластмасс разной конфигурации и размеров: гибкая упаковка; жесткая, блистерная и формованная полимерная тара; одноразовая пластиковая посуда; потребительская упаковка для фасовки и транспортировки пищевых продуктов [1–3].

Для изготовления вышеперечисленных упаковочных изделий используют различные виды полимерных материалов: полиолефины (полиэтилен, полипропилен) [4–6], полиэтилентерефталат [7], полиамид [8], полистирол [9] и их производные.

Современное многообразие пищевых продуктов предъявляет различные требования к упаковочным материалам и изделиям, основными из которых являются защитные и потребительские свойства [10]. В этой связи наиболее используемыми являются полимерные пленочные материалы. К основным достоинствам использования полимерных пленочных материалов, позиционируемых в качестве упаковки, относят требуемые для упаковочных материалов прочность, стойкость к проколу и химическую стойкость, барьерные свойства, легкость в эксплуатации, низкую плотность [11, 12].

Одна из основополагающих проблем пищевой отрасли – ограниченный срок хранения пищевых продуктов. Однослойная гибкая полимерная упаковка в подавляющем большинстве случаев не удовлетворяет предъявляемым к пленочным материалам требованиям [13]. К примеру, полипропиленовая пленка характеризуется низкой паропроницаемостью, но при этом высокой кислородопроницаемостью, что свойственно полиэтилентерефталату. Так, актуальным является изготовление многослойных пленочных материалов, которые характеризуются свойствами, присущими каждому отдельному компоненту, входящему в их состав [14–16]. Для изготовления многослойных пленочных материалов применяют технологию соэкструзии, нередко – каширование. Эти процессы, в свою очередь, более трудоемкие и энергозатратные, чем производство однослойных полимерных пленок [17]. Из большого многообразия полимерных материалов, позиционируемых в качестве упаковочных, полиолефины до сих пор имеют высокие темпы производства, устойчивое развитие и являются актуальными для научных разработок.

Принимая во внимание разные методы и особенности технологий производства упаковочных материалов и изделий, одним из альтернативных и перспективных направлений является разработка технологии изготовления активной упаковки. Данная технология является аналогичной производству однослойной упаковки с возможностью пролонгации срока хранения продуктов [18]. Таким образом, актуальным направлением как в пищевой, так и в упаковочной отрасли является создание полимерных упаковочных материалов с антимикробными свойствами [19].

В качестве модификатора, способствующего приданию полимерной упаковке антимикробных свойств, используют дисперсные наполнители природного и синтетического происхождения, иногда применяют и модификаторы наноразмерных характеристик (наночастицы) [20]. Перспективным антимикробным модификатором является бетулин, который получают путем выделения из коры березы. Он позиционируется как биологически активное вещество. Наличие в его многокомпонентном составе лупенона, увеола, ацетат бетулина и олеиновой кислоты формирует широкий спектр фармакологической, антимикробной, фунгицидной, противовирусной и антимутагенной активности. Также неоспоримым преимуществом использования бетулина является практически неисчерпаемая и возобновляемая сырьевая база, легкость выделения готового продукта при химической и / или механической переработке и высокое содержание основного вещества (25–40 %). Бетулин устойчив к УФ-излучению, нетоксичен, что позволяет применять его в составе полимерных пленочных материалов для прямого контакта с пищевыми продуктами [21–22].

Придание полимерной матрице антимикробной функции достигается при достаточно высоком содержании антимикробного наполнителя, что технологически осуществить практически невозможно. Высокое содержание наполнителя в полимерных смесях вызывает его агломерацию, низкое диспергирование и распределение, что сказывается на структурных характеристиках и свойствах готовых изделий. Одним из научно-практических решений для минимизации технологических проблем при создании активных полимерных материалов является использование ультразвука, который направленно воздействует на расплав полимера при их экструзии, улучшая технологические характеристики пленочных материалов [23, 24]. К наиболее практико-ориентированным методам изготовления активных полимерных пленочных материалов относят переработку через расплав [25] с возможностью масштабирования на существующем технологическом оборудовании для их изготовления [26].

Цель исследования – изучить влияние воздействия ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей на основе термопластичных полиолефинов (полиэтилен, полипропилен), дисперсно-наполненных бетулином, а также их рецептурно-технологических параметров на структурные и антимикробные свойства.

Объекты и методы исследования

Для изготовления антимикробных полимерных композиций использовали две разновидности полиолефинов: полиэтилен низкой плотности 11503-070 (Казаньоргсинтез, Россия) и полипропилен PP H080 CF (SIBEX, Сибур, Россия).

Для придания матрицам полиолефинов антимикробной функции в работе применяли бетулин – соответствующий декларации RU Д-RU.ВЯ01.В24672 от 11.04.2018 экстракт коры березы (ЭКБ, Кортекс, Россия) по ТУ 9154-001-35348291-16.

Полимерные композиции на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, изготавливали на модернизированном плоскощелевом оснащенным ультразвуковой приставкой экструдере с барьерным шнеком (лаборатория Разработки и эксплуатации синтетических и природных полимеров и композитов ФГАОУ «Московский политехнический университет»), варьируя концентрацию бетулина в смесях с полиолефинами от 2–10 мас. %. Выходящий из плоскощелевой головки расплав принимали на охлаждаемые валы и формировали в пленки толщиной (70 ± 3 мкм).

Температурные режимы получения полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, представлены в таблице 1.

Технологическая особенность получения полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, состоит в том, что расплавы полимерных смесей дополнительно подвергали направленному воздействию ультразвуковых колебаний (УЗ) при формовании пленок из них. Технологические параметры процесса представлены в таблице 2. Ультразвуковую приставку устанавливали между зоной дозирования и плоскощелевой головкой экструдера, погруженного непосредственно в расплав.

Влияние ультразвукового воздействия при обработке расплавов полимерных композиций разных смесевых составов на их фазовое состояние определяли с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSC 204 F1 (NETZSCH, Германия) в интервале температур 20–200 °С при скорости сканирования 10 град/мин и навеске образца 11 ± 1 мг. В качестве теплофизических свойств определяли температуру плавления ($T_{пл}$), степень кристалличности ($\chi_{кр}$), энтальпию плавления (ΔH). Для расчета степени кристалличности полимерных композиций использовали энтальпии плавления полностью кристаллического полиэтилена (ПЭ) – ΔH(ПЭ) = 293 Дж/г и кристаллического полипропилена (ПП) – ΔH(ПП) = 147 Дж/г согласно ГОСТ 55134-2012.

Влияние ультразвукового воздействия на реологические свойства (текучесть) полимерных композиций при их экструзии определяли на измерителе индекса расплава термопластов ИИРТ-5 (Точмашприбор, Россия). При проведении испытаний полимерные смеси загружали в цилиндрический бункер ИИРТ-5 и нагревали до 190 °С. При воздействии груза массой 2,16 кг вытекающий через сквозное отверстие капилляра (d = 2,095 мм) расплав отсекали (10 мин) и измеряли его массу в соответствии с ГОСТ 11645-2021.

Таблица 1. Температурные режимы изготовления полимерных композиций

Table 1. Temperature modes for polymer compositions

Композиция	Температура по зонам цилиндра, °С				
	Зона экструдера				
	1 зона	2 зона	3 зона	4 зона	5 зона
ПЭ:бетулин	100	110	120	130	130
ПП:бетулин	160	165	170	175	180

Таблица 2. Технологические параметры обработки расплавов полимерных смесей ультразвуком

Table 2. Ultrasonication of polymer melts: Processing parameters

Параметры ультразвуковой приставки	Технические показатели
Генератор колебаний	до 25 кГц
Торец волновода	до 10 мкм
Частота колебаний	20 кГц
Мощность генератора	1,2 кВт

Воздействие ультразвука на деформационно-прочностные свойства полимерных композиций определяли в соответствии с ISO 527-3:2018. В качестве показателей деформационно-прочностных свойств исследовали разрушающее напряжение при растяжении ($\sigma_р$) и относительное удлинение при разрыве ($\varepsilon_р$).

Структурно-морфологические свойства поверхности полимерных композиций и модифицированных воздействием ультразвука изучали с помощью высокоразрешающего автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа JSM-7500F (JEOL, Япония).

Химическую структуру полимерных композиций, расплавы которых подвергали воздействию ультразвуковых колебаний, определяли согласно ГОСТ 57939-2017 Фурье ИК-спектроскопией с приставкой НПВО на приборе ФСМ-1201 (Инфраспек, Россия) с разрешением в 1 $см^{-1}$ в диапазоне волновых чисел от 375 до 4000 $см^{-1}$.

Исследование полимерных композиций на определение антимикробных свойств проводили дисковым диффузионным методом в соответствии с руководством МУК 4.2.1890-04.

В качестве тест-микроорганизмов использовали грамположительные и грамотрицательные стафилококк (*Staphylococcus aureus*), кишечную палочку (*Escherichia coli*), синегнойную палочку (*Pseudomonas aeruginosa*), дрожжевые грибки (*Candida albicans*).

Тестируемые штаммы культивировали в пробирках на скошенной агаризированной питательной среде в термостате при температуре 35 ± 1 °С. По истечении 24 ч с использованием денситометра готовили микробную суспензию, соответствующую оптическому стандарту мутности Мак-Фарланда № 0,5; затем доводили ее до $1{,}5\times10^8$ кл./мл.

На чашки Петри с агаризированной питательной мясо-пептонной средой и питательным агаром Сабуро наносили взвесь тест-микроорганизмов (200 мкл), равномерно распределяя стерильным шпателем по поверхности, на них укладывали исследуемые образцы размером 1×1 см.

Посевы помещали в термостат при температуре 35 ± 1 °С на 24 ч. После оценивали рост микроорганизмов и измеряли площадь зоны ингибирования роста при наличии. Антимикробные свойства полимерных композиций выражали в коэффициенте ингибирования роста (КИ), который рассчитывали как $S_{ЗИР}/S_{образца\ пленки}$.

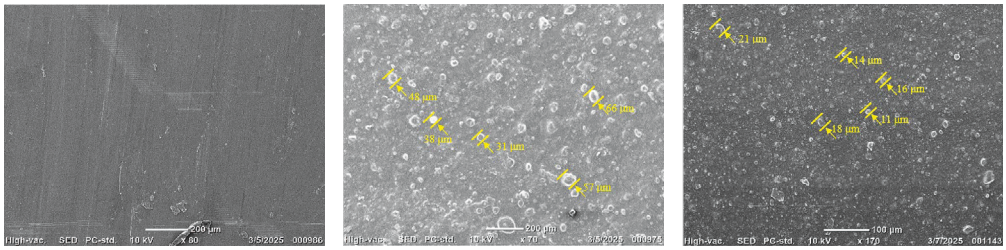
Результаты и их обсуждение

Придание антимикробных свойств полимерным композициям и изделиям на их основе зависит не только от равномерного, но и объемного распределения наполнителя в матрице полимера при формировании структуры в процессе экструзии.

Морфология поверхности пленки на основе полипропилена (рис. 1a) представляет бездефектную, сплошную, монолитную поверхность с ориентационными тяжами, соответствующими фибрилярной структуре, которую возможно получить в процессе медленной вытяжки расплава полимера при формовании полимерных пленок из него. Для полимерной композиции на основе полипропилена, дисперсно-наполненного бетулином (10 мас. %) (рис. 1b), заметно неоднородное распределение последнего в матрице полипропилена, как и в случае полимерных композиций на основе полиэтилена. Это обусловлено широким его распределением по размеру (10–70 мкм) и влияет на образование агломератов вследствие их высокой поверхностной энергии. При воздействии ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей размер частиц бетулина значительно (10–25 мкм) снижался (рис. 1c), что связано с кавитационным потоком, возникающим при воздействии ультразвуковых колебаний, который разрушает агломерированные частицы бетулина, дополнительно диспергируя их. В результате этого процесса возможно получить более гомогенное его распределение в смесях с полиолефинами, регулируя размеры частиц, обладающих сферической и / или неправильной формой, которые распределяются не только на поверхности, но и в объеме, что предопределяет улучшение его влияния на анаэробное и / или аэробное ингибирование в зависимости от вида тест-микроорганизмов.

Позиционируя разработанные полимерные композиции в качестве активной упаковки, необходимо учитывать технологию их получения. Одним из практико-ориентированных методов является экструзия. Определили влияние ультразвука на теплофизические (рис. 2) и реологические свойства полимерных композиций, в которых содержание бетулина в смесях с полиолефинами составляет 10 мас. %.

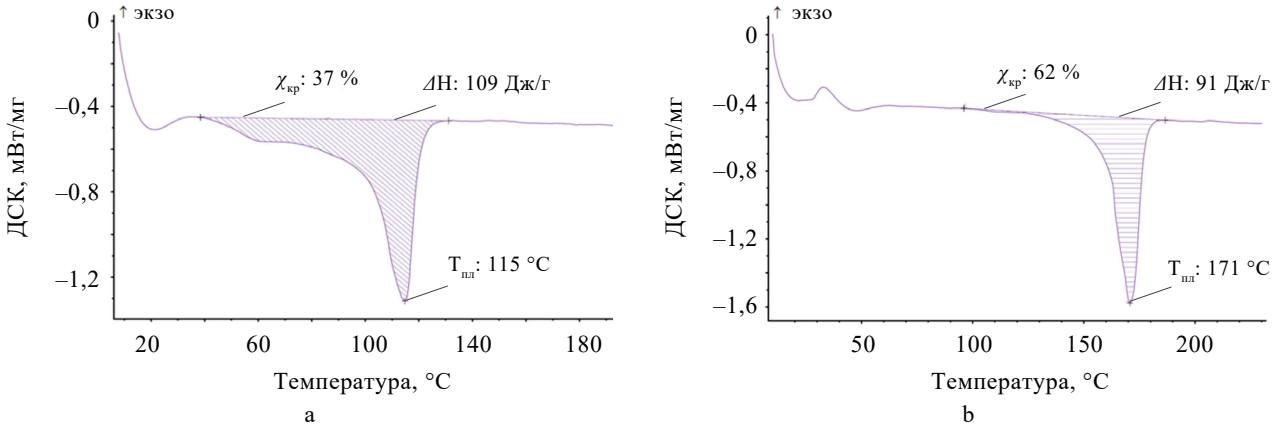
ДСК кривая полимерной композиции на основе полиэтилена, представленная на термограмме, имеет эндотермический пик, позволяющий идентифицировать



a b c

Рисунок 1. СЭМ изображения структурно-морфологических свойств поверхности полимерных композиций: a – ПП ; b – ПП:бетулин (90:10 мас. %); c – ПП:бетулин (90:10 мас. %) при ультразвуковом воздействии

Figure 1. SEM images of structural and morphological properties of the surface of polymer compositions: a – polypropylene; b – polypropylene:betulin (90:10 wt.%); and c – polypropylene:betulin (90:10 wt.%) with ultrasonication



ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия

Рисунок 2. Теплофизические свойства полимерных композиций 90:10 мас. % при ультразвуковом воздействии: a – ПЭ:бетулин; b – ПП:бетулин

Figure 2. Thermophysical properties of polymer compositions 90:10 wt.%: with ultrasonication: a – polyethylene:betulin; b – polypropylene:betulin

наличие кристаллической фазы с температурой плавления 115 °С, удельной энергией эндотермического процесса 109 Дж/г и, как следствие, со степенью кристалличности 37 %. Наличие небольшого эндотермического пика плавления при температуре 60 °С свидетельствует о начальном процессе размягчения полиэтилена, что, вероятно, связано с содержанием низкомолекулярных веществ в его структуре. Для полимерной композиции на основе полипропилена, как и в случае полимерной композиции на основе полиэтилена, на термограмме присутствовала кристаллическая фаза с температурой плавления 171 °С. Энтальпия плавления на 18 Дж/г ниже, чем для полиэтилена (91 Дж/г), при этом степень кристалличности составляла 62 %. При воздействии ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей теплофизические свойства полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, не изменялись и представляли собой классический вид плавления полиолефинов. Таким образом, в данном случае ультразвуковая модификация расплавов полимерных смесей не влияла на температуру их переработки.

Показатель текучести расплава при отливе полиэтиленовой пленки составляет 7 г/10 мин, для полипропиленовой – 8 г/10 мин. При увеличении содержания бетулина в смесях с полиолефинами показатель текучести расплава снижался (рис. 3), что обусловлено его большей массовой долей в полимерных композициях, а также исходным размером частиц. Для полимерных композиций на основе полиэтилена и бетулина-10 мас. %, показатель текучести расплава в сравнении с исходной полиэтиленовой пленкой снижался

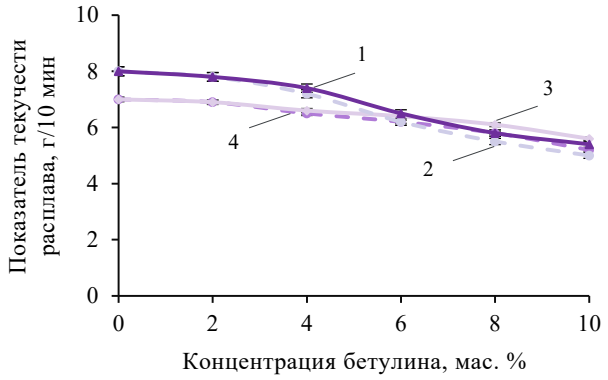


Рисунок 3. Влияние ультразвукового воздействия на показатель текучести расплава полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином: при ультразвуковом воздействии (1 – ПП, 3 – ПЭ); без ультразвукового воздействия (2 – ПП, 4 – ПЭ)

Figure 3. Effect of ultrasonic exposure on melt flow index of polymer compositions based on polyolefins dispersed with betulin with ultrasonication (1 – polypropylene, 3 – polyethylene); without ultrasonication (2 – polypropylene, 4 – polyethylene)

на 26,0 %, для полимерных композиций на основе полипропилена при том же массовом содержании бетулина – на 37,5 %. При воздействии ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей в процессе экструзии показатель текучести расплава для полимерных композиций снижался в меньшей степени: на основе полиэтилена и бетулина – на 6 %, на основе полипропилена и бетулина – на 5 %. Воздействие ультразвуковых колебаний до 6 мас. % бетулина в смесях с полиолефинами не влияло на изменение показателя текучести расплава. Это позволяет сделать вывод, что модификация расплавов полимерных смесей ультразвуковым воздействием при более высоком массовом содержании бетулина эффективнее. Такой подход способствует минимизации образования агломерированных частиц бетулина, диспергируя их, и позволяет изготавливать полимерные композиции при переработке через расплав с более гомогенным его распределением в смесях с полиолефинами. При этом снижение показателя текучести расплава для полимерных композиций на основе полиолефинов и бетулина не влияет на производительность экструзионного оборудования и является как эргономически, так и экономически эффективным.

Для дополнительного определения механизма воздействия ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей при изготовлении композиционных материалов на основе полиолефинов и бетулина определили их химический состав методом ИК-спектроскопии. Для полиэтиленовой пленки на ИК-спектре (рис. 4a) присутствуют асимметричные и симметричные полосы поглощения в области 2950 и 2850 $см^{-1}$ и деформационные колебания в области 1460 $см^{-1}$, характерные для наличия CH_2-групп. На ИК-спектре полипропиленовой пленки (рис. 4b) присутствует интенсивная полоса поглощения в области 2950 $см^{-1}$, характерной для асимметричной CH_2-группы, и интенсивные полосы поглощения в областях 1435 и 1370 $см^{-1}$, характерных для асимметричной деформационной CH-группы и симметричной CH_3-группы. Так, полиолефиновые пленки представляют собой классические спектры, соответствующие исходным полиэтилену низкой плотности и изотактическому полипропилену.

Для полимерной композиции на основе полиэтилена, дисперсно-наполненной бетулином (10 мас. %), дополнительно к функциональным группам, соотнесенным к полиэтилену, на ИК-спектрах (рис. 5) появилась широкая полоса поглощения в области 3300 $см^{-1}$, характерная для OH-групп. Она относится к бетулину и свидетельствует о его частичной гидрофильности. Также появилась полоса поглощения в области 1200 до 960 $см^{-1}$, характерная для CH-групп и CH-колебаний бензольного кольца. Таким образом, наличие бетулина до 10 мас. % в составе полимерных композиций не влияло на изменение их химической структуры, а также позволяло установить физический, а не химический (или другой) тип взаимодействия в системе полимер / наполнитель.

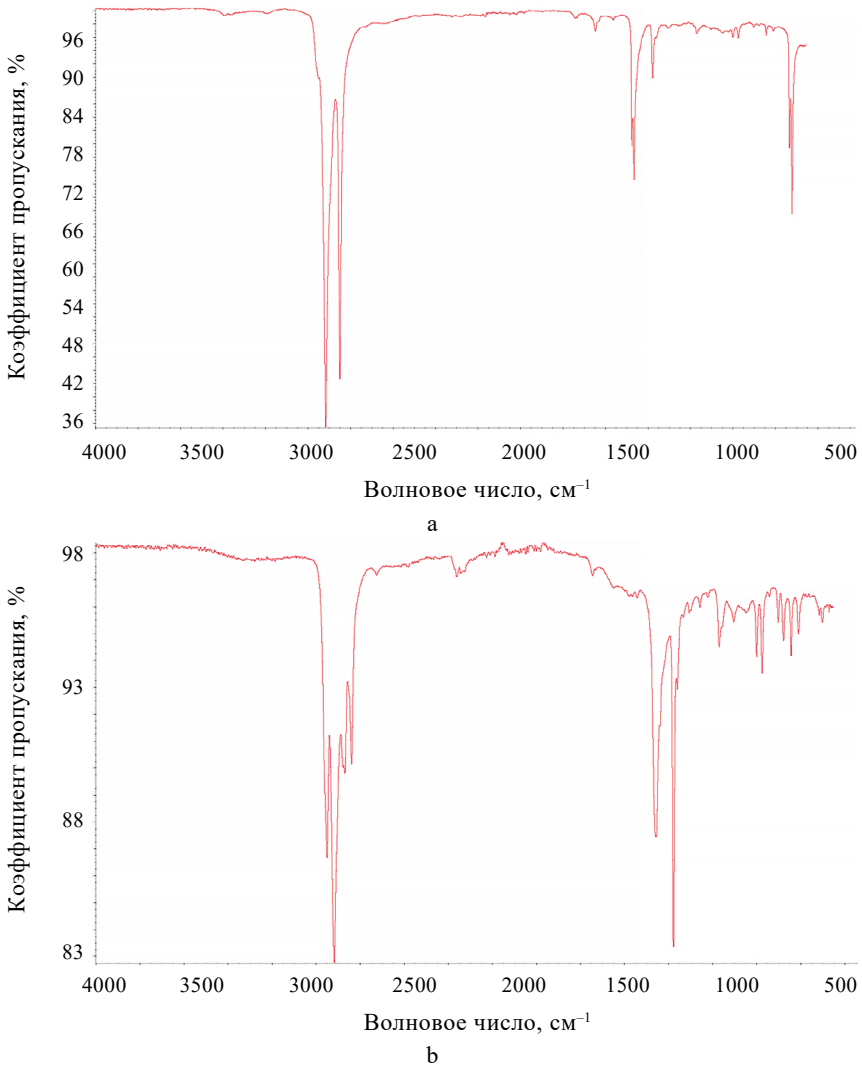


Рисунок 4. ИК-спектры исходных полиэтилена низкой плотности (a) и изотактического полипропилена (b)

Figure 4. IR spectra of initial low-density polyethylene (a) and isotactic polypropylene (b)

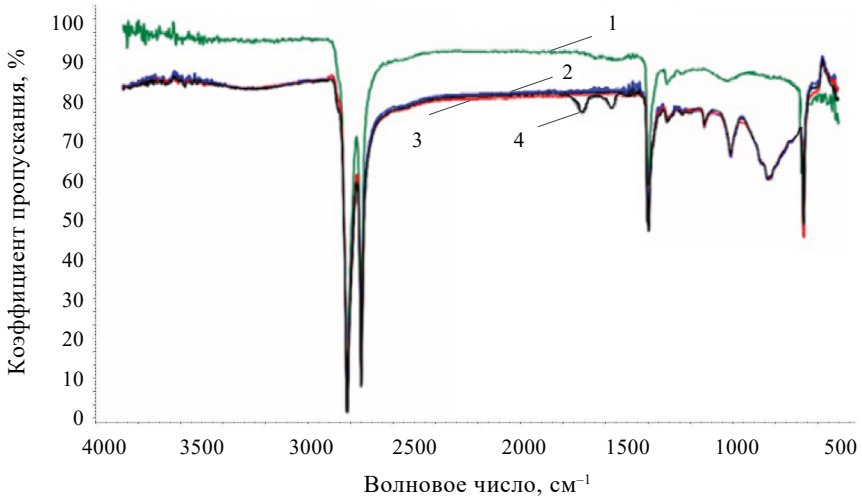


Рисунок 5. ИК-спектры полимерных композиций: 1 – исходная пленка ПЭ; 2 – ПЭ:бетулин (95:5 мас. %); 3 – ПЭ:бетулин (90:10 мас. %); 4 – ПЭ:бетулин (90:10 мас. %) при ультразвуковом воздействии

Figure 5. IR spectra of polymer compositions: 1 – initial polyethylene film; 2 – polyethylene:betulin (95:5 wt.%); 3 – polyethylene:betulin (90:10 wt.%); and 4 – polyethylene:betulin (90:10 wt.%) with ultrasonication

Для полимерных композиций на основе полиолефинов и беутлина-10 мас. %, расплавы которых подвергали воздействию ультразвуковых колебаний, на ИК-спектре появились дополнительные полосы поглощения в области 1740–1720 $см^{-1}$, указывающие на наличие С=О-групп, и 1600 $см^{-1}$, характерные для СООН-групп. Следовательно, воздействие ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей при экструзии позволяет увеличить полярность синтетических термопластов, влияющую на смачивающую способность, проявляющуюся в увеличении межфазного взаимодействия между полиолефинами и бетулином.

Для активной полимерной упаковки важно учитывать комплекс деформационно-прочностных свойств. Для этого определили разрушающее напряжение при растяжении (рис. 6) и относительное удлинение при разрыве (рис. 7).

Для полиэтиленовой пленки разрушающее напряжение при растяжении составляло 16 МПа, для полипропиленовой – 27 МПа. При увеличении содержания бетулина до 10 мас. % в смесях с полиолефинами прочность полимерных композиций снижалась, что обусловлено образованием гетерогенной структуры. Так, разрушающее напряжение при растяжении полимерных композиций на основе полиэтилена и бетулина до 10 мас. % снижалось на 23 % и составляло 12,4 МПа. Для полимерных композиций на основе полипропилена и бетулина при том же массовом содержании, как и в случае с полимерными композициями на основе полиэтилена, разрушающее напряжение при растяжении снижалось на 19 % и составляло 22 МПа.

У полимерных композиций на основе полиолефинов и бетулина (10 мас. %), расплавы которых подвергали ультразвуковому воздействию, снижение прочностных свойств осуществлялось в меньшей степени. Разница для полимерных композиций на основе полиэтилена составляла 13 %, на основе полипропилена – 12 %. Этим опосредованно увеличение межфазного взаимодействия между компонентами, которое обеспечивают полярные (СООН- и С=О-) функциональные группы.

Аналогичную зависимость наблюдали и при определении деформационных свойств. Относительное удлинение при разрыве для полиэтиленовой пленки составляло 390 %, для полипропиленовой – 250 %. При увеличении содержания бетулина в смесях с полиолефинами до 10 мас. % деформационные свойства полимерных композиций снижались: на основе полиэтилена – на 8 %; полипропилена – на 16 %. При воздействии ультразвуковых колебаний на их расплавы разница в деформационных свойствах, в сравнении с исходными полимерными композициями, составляла: для полиэтиленовой – 2 %, для полипропиленовой – 4 %. Анализируя деформационно-прочностные свойства, можно заключить, что полимерные композиции на основе полиолефинов и бетулина целесообразны для применения в качестве упаковочных материалов.

Исследование полимерных композиций на основе полиолефинов с бетулином осуществляли для определения антимикробных свойств. В качестве тест-микроорганизмов использовали грамположительные и грамотрицательные стафилококк *Staphylococcus aureus* (штамм 906), кишечную палочку *Escherichia coli* (штамм 1257), синегнойную палочку *Pseudomonas aeruginosa* (АТСС 27853), дрожжевые грибки *Candida albicans* (РКПГУ 1353/1277) (рис. 8).

Исследуемые полимерные композиции на основе синтетических полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином до 2 мас. %, не обладали антимикробным

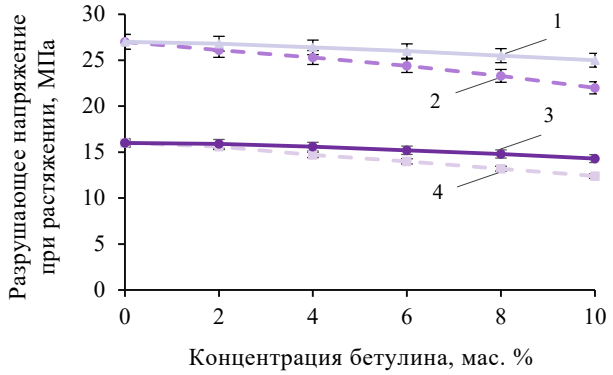


Рисунок 6. Влияние ультразвука на прочностные свойства полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, при ультразвуковом воздействии (1 – ПП, 3 – ПЭ); без ультразвукового воздействия (2 – ПП, 4 – ПЭ)

Figure 6. Effect of ultrasound on tensile properties of polymer compositions based on polyolefins dispersed with betulin: with ultrasonication (1 – polypropylene, 3 – polyethylene); without ultrasonication (2 – polypropylene, 4 – polyethylene)

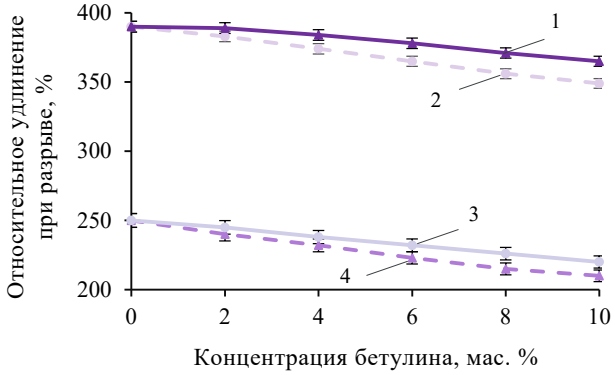


Рисунок 7. Влияние ультразвука на деформационные свойства полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, при ультразвуковом воздействии (1 – ПЭ, 3 – ПП); без ультразвукового воздействия (2 – ПЭ, 4 – ПП)

Figure 7. Effect of ultrasound on deformation properties of polymer compositions based on polyolefins dispersed with betulin: with ultrasonication (1 – polyethylene, 3 – polypropylene); without ultrasonication (2 – polyethylene, 4 – polypropylene)

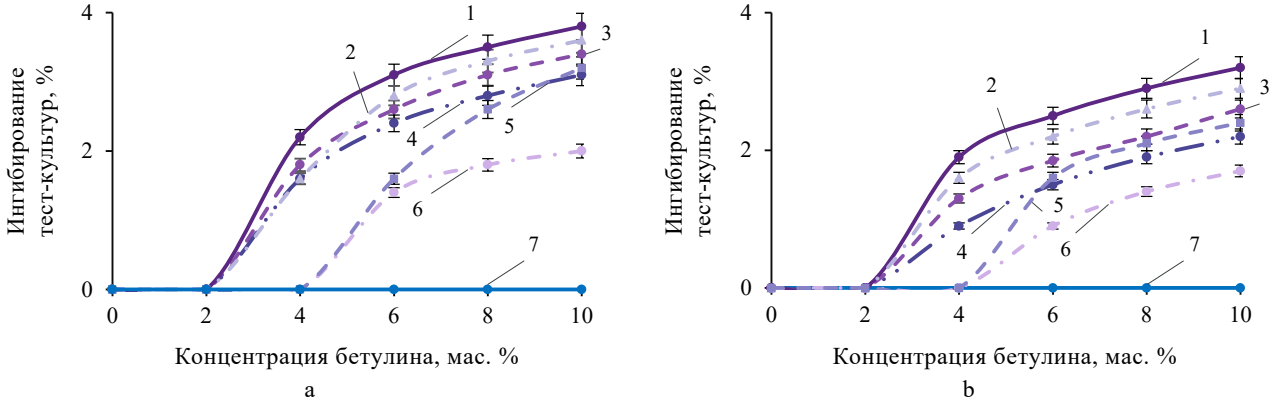


Рисунок 8. Влияние ультразвукового воздействия на коэффициент ингибирования тест-культур: a – ПЭ:бетулин; b – ПП:бетулин (*Candida albicans*: 1 – при ультразвуковом воздействии, 3 – без ультразвукового воздействия; *Pseudomonas aeruginosa*: 2 – при ультразвуковом воздействии, 4 – без ультразвукового воздействия; *Staphylococcus aureus*: 5 – при ультразвуковом воздействии, 6 – без ультразвукового воздействия; 7 – *Escherichia coli*)

Figure 8. Effect of ultrasound exposure on the inhibition rate of test cultures: a – polyethylene:betulin; b – polypropylene:betulin (*Candida albicans*: 1 – with ultrasonication, 3 – without ultrasonication; *Pseudomonas aeruginosa*: 2 – with ultrasonication, 4 – without ultrasonication; *Staphylococcus aureus*: 5 – with ultrasonication, 6 – without ultrasonication; and 7 – *Escherichia coli*)

действием. Полимерная композиция на основе полиэтилена с бетулином при 4 мас. % приобретала избирательную противомикробную активность в значениях коэффициента ингибирования роста (КИ) = 0,9 и 1,3 %, ингибировала рост бактерий *P. aeruginosa* и рост дрожжевых грибков *C. albicans*. Значимый результат по определению антимикробной активности полимерных композиций на основе полиэтилена в смесях с бетулином достигнут при 10 мас. % последнего; КИ в отношении *S. aureus* составил 1,7 %; *P. aeruginosa* – 2,2 %. Максимальный результат достигнут в отношении *C. albicans* – 2,6 %.

Для полимерных композиций на основе полипропилена в смесях с бетулином – 10 мас. %, КИ в отношении роста *S. aureus* составил 2,0 %; *P. aeruginosa* – 3,1 %; максимальный результат достигнут в отношении *C. albicans* – 3,4 %.

При определении антимикробных свойств полимерных композиций на основе полиолефинов, наполненных бетулином до 10 мас. %, расплавы которых модифицировали ультразвуковым воздействием, КИ в отношении тест-микроорганизмов увеличивался. Так, для полимерных композиций на основе полиэтилена с бетулином КИ в отношении *P. aeruginosa* составил 2,9 %; *S. aureus* – 2,4 %; *C. albicans* – 3,2 %. Для полимерных композиций на основе полипропилена КИ в отношении *P. aeruginosa* – 3,6 %; *S. aureus* – 3,2 %; *C. albicans* – 3,8 %. Повышение коэффициента ингибирования у исследуемых тест-микроорганизмов полимерных композиций на основе полиолефинов в смесях с бетулином, полученных при обработке расплавов ультразвуковым воздействием, вероятно, связано с тем, что гомогенное распределение последнего в матрицах полиолефинов и наличие полярных групп на их поверхности разрушают клеточные стенки микроорганизмов, мешая их синтезу, что приводит к мутации и гибели клеток.

При этом на чашках Петри с «газонными» культурами *E. coli* наблюдали, что зоны подавления репродуцирования отсутствовали, но при этом рост бактерий под фрагментами полимерных композиций не выявлен и позволяет сделать вывод, что антимикробный наполнитель – бетулин – для данной группы тест-микроорганизмов ингибирующее воздействие не оказывал.

Таким образом, применение бетулина в смесях с полиолефинами, модифицированными воздействием ультразвуковых колебаний их расплавов при экструзии, является перспективной технологией, которая позволяет изготавливать полимерные упаковочные материалы с заданными свойствами, в том числе антимикробными.

Выводы

Проведено комплексное исследование, направленное на определение влияния воздействия ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином от 2 до 10 мас. %, при изготовлении полимерных композиций из них.

Воздействие ультразвуковых колебаний на расплавы полимерных смесей проявляет эффективность выше 6 мас. % бетулина в смесях с полиолефинами, в результате чего становится возможным диспергировать агломерированные частицы бетулина в матрицах полиолефинов, снижая их размер в 3 раза (с 70 мкм для исходных до 20 мкм для модифицированных ультразвуком). Деформационно-прочностные свойства снижались в меньшей степени вследствие увеличения межфазного взаимодействия в системе полимер /

наполнитель, что проявлялось при появлении функциональных групп с полярной структурой (карбонильной и карбоксильной).

В полимерных композициях, для которых ультразвук не применяли, взаимодействие компонентов при переработке через расплав осуществлялось путем физического, а не химического (или другого) типа взаимодействия. Это подтверждается ИК-спектрами, на которых отсутствуют полосы поглощения, нехарактерные для функциональных групп исходных полиолефинов. Воздействие ультразвуковых колебаний на расплавы полимеров не влияло на температурные режимы их переработки и в значительной степени не снижало производительность экструзионного оборудования, что является как эргономически, так и экономически эффективным.

Самый высокий коэффициент ингибирования роста (КИ) микроорганизмов осуществлялся при 10 мас. % бетулина в смесях с полиолефинами, расплавы которых подвергали воздействию ультразвуковых колебаний. Для полимерных композиций на основе полиэтилена КИ микроорганизмов составил: *Staphylococcus aureus* – 2,4 %; *Pseudomonas aeruginosa* – 2,9 %; *Candida albicans* – 3,2 %. Для полимерных композиций на основе полипропилена КИ микроорганизмов составил: *S. aureus* – 3,2 %; *P. aeruginosa* – 3,6 %; *C. albicans* – 3,8 %. При этом для полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином, в отношении *Escherichia coli* установили, что подавление репродуцирования микроорганизмов отсутствовало.

Критерии авторства

И. Ю. Васильев – руководство проектом, редактирование и окончательное одобрение рукописи; В. А. Род – сбор и обработка материала; О. А. Савельева – проведение исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

I.Yu. Vasilyev supervised the project and proofread the final version of the manuscript; V.A. Rod collected and processed the material; O.A. Saveleva conducted the research.

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Guivan MYu, Ovchinnikov VA, Mamin EA, Pantyukhova PV, Mastalygina EE, *et al*. The influence of metal sludge on the oxidative destruction of low-density polyethylene. Polymer Science, Series D. 2024;17(2):502–506. https://doi.org/10.1134/S1995421224700850

2. Brovina SD, Mastalygina EE, Trofimchuk ES, Popov AA. Development of materials based on poly(lactic acid) and copper(II) sulfate impregnated by the crazing method. Colloid Journal. 2024;86(1):4–13. https://doi.org/10.1134/S1061933X23601178

3. Миролюбова Т. В., Бенеманская Е. А., Редина Л. В., Неяглов О. С. Антимикробные свойства мастербатчей на основе полиолефинов и квазикристаллов. Инновационное развитие техники и технологий в промышленности. Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием. Часть 3. Москва, 2023. С. 53–58. [Mirolyubova TV, Benemanskaya EA, Redina LV, Neyaglova OS. Antimicrobial properties of masterbatches based on polyolefins and quasicrystals. Innovative industrial engineering and technology. Proceedings of the All-Russian scientific conference of young researchers, with international participation. Part 3. Moscow, 2023. pp. 53–58. (In Russ.)] https://elibrary.ru/OEWYBX

4. Русланова С. Н., Юсупов Б. Н., Бородина А. С., Темникова Н. Е., Зиганшина А. С. и др. Исследование смесей полиолефинов с сополимерами этилена и винилового спирта. Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 2. С. 36–42. [Rusanova SN, Yusupov BN, Borodina AS, Temnikova NE, Ziganshina AS, *et al*. Investigation of mixtures of polyolefins with ethylene copolymers with vinyl alcohol. All materials. Encyclopedic Handbook. 2024;(2):36–42. (In Russ.)] https://doi.org/10.31044/1994-6260-2024-0-2-36-42

5. Троян А. С., Троян А. А. Переработка вторичного полиэтилентерефталата. Химия и химическая технология в XXI веке. Материалы XXIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л. П. Кулёва и Н. М. Кижнера. В 2-х томах. Т. 2. Томск, 2022. С. 339–341. [Troyan AS, Troyan AA. Recycling of secondary polyethylene terephthalate. Chemistry and chemical technology in the 21st century. Proceedings of the 23rd L. P. Kulev and N. M. Kizhner International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists. In 2 Vol. Tomsk, 2022;339–341. (In Russ.)] https://elibrary.ru/VFWBOW

6. Ухарцева И. Ю., Цветкова Е. А., Гольдаде В. А., Шаповалов В. М. Технологические аспекты производства тары и упаковки для пищевых продуктов (обзор). Полимерные материалы и технологии. 2022. Т. 8. № 4. С. 6–31. [Ukhartseva IYu, Tsvetkova EA, Goldade VA, Shapovalov VM. Technological aspects of manufacturing containers and packaging for food products. Polymer materials and technologies. 2022;8(4):6–31. (In Russ.)] https://doi.org/10.32864/polymmattech-2022-8-4-6-31

7. Пономарев А. П. Проблемы качества вторичного полимерного сырья для производства промышленной упаковки. Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования. Материалы III Национальной научно-практической конференции. Под редакцией И. А. Долматовой. Магнитогорск, 2023. С. 86–88. [Ponomarev AP. Quality issues of secondary polymer raw materials for industrial packaging production. Relevant issues and prospects for the development of science, technology, and education. Proceedings of the 3rd National Scientific and Practical Conference. Edited by I. A. Dolmatova. Magnitogorsk, 2023. pp. 86–88. (In Russ.)] https://elibrary.ru/RSLURQ

8. Зверькова Я. А., Хамнаева Н. И. Исследование технологии получения упаковочных материалов для продуктов питания. Вестник ВСГУТУ. 2020. № 4. С. 31–36. [Zverkova YaA, Khamnaeva NI. Research of technology for obtaining packaging materials for food products. ESSUTM Bulletin. 2020;(4):31–36. (In Russ.)]

9. Шарифов Д. М., Ниязбекова Р. К., Мухамбетов Г. М., Михалченко В. Н., Бегайдарова Ж. А. и др. Технология получения и перспективы развития нанокомпозитных материалов на полимерной основе. Физика твердого тела. Материалы XV Международной научной конференции. Астана, 2022. С. 152–154. [Sharifov DM, Niyazbekova RK, Mukhambetov GM, Mikhalchenko VN, Begaidarov ZhA, *et al*. Technology and development prospects of polymer-based nanocomposite materials. Solid state physics. Proceedings of the 15th International Scientific Conference. Astana, 2022. pp. 152–154. (In Russ.)] https://elibrary.ru/QCBTEQ

10. Тришина О. А., Кормильцева К. А. Повышение экологичности полимерных отходов. Актуальные вопросы общества, науки и образования. Сборник статей V Международной научно-практической конференции. Часть 1. Пенза, 2023. С. 189–191. [Trishina OA, Kormiltseva KA. Sustainable polymer waste. Current issues in society, science, and education. Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference. Part 1. Penza, 2023. pp. 189–191. (In Russ.)] https://elibrary.ru/OMYNUX

11. Фролов Е. И. Упаковочные материалы на основе фторполимеров: преимущества и будущее. Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей XXXVII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2024. С. 9–11. [Frolov EI. Fluoropolymer-based packaging materials: Advantages and prospects. Modern Science: Current Issues, Achievements, and Innovations. Collection of Articles from the 37th International Scientific and Practical Conference. Penza, 2024. pp. 9–11. (In Russ.)] https://elibrary.ru/QSEYQP

12. Ухарцева И. Ю., Цветкова Е. А., Гольдаде В. А. Методы изготовления полимерной упаковки для пищевых продуктов (обзор). Пластические массы. 2020. № 7–8. С. 40–48. [Ukhartseva IYu, Tsvetkova EA, Goldade VA. Methods of manufacturing polymeric food packaging (Overview). Plastics. 2020;(7–8):40–48. (In Russ.)] https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-7-8-40-48

13. Магаюмова О. Н., Белокурова Г. Б., Минеева Н. С. Технология производства перспективной полимерной упаковки для диоксида циркония длительного хранения. Международный научный сборник. Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2022. № 17. С. 131–142. [Magayumova ON, Belokurova GB, Mineeva NS. Production technology of promising polymer for long-term storage of zirconium dioxide. International scientific collection. Innovative technologies for the production and storage of material assets for state needs. 2022;(17):131–142. (In Russ.)] https://elibrary.ru/VEAJLX

14. Стефанович М. А., Губачев В. А., Толстов А. М. Моделирование экструзионных процессов расплава полимерных композитов. Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2022. № 2. Номер статьи 2. [Stefanovich MA, Gubachev VA, Tolstov AM. The modelling of extrusion melt processes for polymer composites. International Journal of Applied Science and Technology Integral. 2022;(2):2. (In Russ.)] https://doi.org/10.55186/02357801_2022_7_2_1

15. Шурыгина Н. А., Глезер А. М. Перспективные материалы и технологии. Деформация и разрушение материалов. 2020. № 2. С. 2–15. [Shurygina NA, Glezer AM. Production methods of amorphous-crystalline materials. Deformation and destruction of materials. 2020;(2):2–15. (In Russ.)] https://doi.org/10.31044/1814-4632-2020-2-2-15

16. Мисин В. М., Зезин А. А., Климов Д. И., Сыбачин А. В., Ярославов А. А. Биоцидные полимерные рецептуры и покрытия. Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2021. Т. 63. № 5. С. 295–306. [Misin VM, Zezin AA, Klimov DI, Sybachin AV, Yaroslavov AA. Biocidal polymer formulations and coatings. Polymer Science. Series B. 2021;63(5):295–306. (In Russ.)] https://doi.org/10.31857/S2308113921050077

17. Афанасьева П. В., Ботвинкова С. А., Мацкив А. А., Тимчук Е. Г. Методические положения оценки качества пищевых продуктов. Инновационные научные исследования в современном мире. Сборник научных статей по материалам IX Международной научно-практической конференции. Часть 1. Уфа, 2022. С. 74–82. [Afanasyeva PV, Botvinkova SA, Matskiv AA, Timchuk EG. Methodological guidelines for assessing food quality. innovative scientific research in the modern world. Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference. Part 1. Ufa, 2022. pp. 74–82. (In Russ.)] https://elibrary.ru/YTIQKV

18. Дерябина Е. А., Гладских А. Д. Асептическая упаковка жидких продуктов. Качество продукции, технологий и образования. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. Магнитогорск, 2019. С. 203–205. [Deryabina EA, Gladskikh AD. Quality of products, technologies, and education. Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. Magnitogorsk, 2019. pp. 203–205. (In Russ.)] https://elibrary.ru/EFSGJZ

19. Жаринов А. И. Пищевые добавки и ингредиенты: особенности использования в технологии мясных продуктов. Мясные технологии. 2021. № 6. С. 38–43. [Zharinov AI. Food additives and ingredients: features of use in meat products technology. Meat technology. 2021;(6):38–43. (In Russ.)] https://doi.org/10.33465/2308-2941-2021-06-38-43

20. Касымакунова А. М., Омурзак уулу Э., Акай Тегин Р. А. Исследование антимикробных свойств наночастиц в активной упаковке пищевых продуктов. Известия КГТУ. 2023. № 1. С. 666–673. [Kasymakunova AM, Omurzak uulu E, Akai Tegin RA. Study of the antimicrobial properties of nanoparticles in active food packaging. The Herald of KSTU. 2023;(1): 666–673. (In Russ.)] https://doi.org/10.56634/16948335.2023.1.666-673

21. Коляда Л. Г., Тарасюк Е. В., Васькина А. К., Эргардт Р. В. Высокобарьерная упаковка для пищевых продуктов. Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2019. Т. 10. № 1. С. 143–147. [Kolyada LG, Tarasyuk EV, Vaskina AK, Ergardt RV. High-barrier food packaging. Current problems of modern science, technology and education. 2019; 10(1):143–147. (In Russ.)]

22. Ревуцкая Н. М., Насонова В. В., Левина Л. В. Антимикробная упаковка – способы получения и эффективность применения в мясной промышленности. Всё о мясе. 2020. № 2. С. 30–34. [Revutskaya NM, Nasonova VV, Levina EV. Antimicrobial packaging – methods to obtain and effectiveness of application in the meat industry. Vsyo o myase. 2020;(2):30–34. (In Russ.)] https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-2-30-34

23. Кирш И. А., Тверитникова И. С., Безнаева О. В., Банникова О. А., Кондратова Т. А. и др. Исследование влияния ультразвуковой обработки полиэтиленовых композиций, содержащих бетулин, на формирование эксплуатационных свойств упаковочных материалов. Health, Food & Biotechnology. 2020. Т. 2. № 4. С. 28–40. [Kirsh IA, Tveritnikova IS, Beznaeva OV, Bannikova OA, Kondratova TA, *et al*. Study of the influence of ultrasonic processing of polyethylene compositions containing betulin on the formation of operational properties of packaging materials. Health, Food & Biotechnology. 2020;2(4):28–40. (In Russ.)] https://doi.org/10.36107/hfb.2020.i4.s73

24. Tveritnikova IS, Kirsh IA, Beznaeva OV. Modification of ultrasonic machining of polyolefinic, starch-containing composite materials in the process of extrusion. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;1052(1):012133. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1052/1/012133

25. Shlush E, Davidovich-Pinhas M. Bioplastics for food packaging. Trends in Food Science & Technology. 2022;125: 66–80. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.026

26. Klaiber M, Moreno-Gordaliza E, Gómez-Gómez MM, Marazuela MD. Human intake assessment of triclosan associated with the daily use of polypropylene-made antimicrobial food packaging. Food Chemistry. 2024;451:139475. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139475

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Васильев Илья Юрьевич / Ilya Yu. Vasilyev ORCID 0000-0001-8488-5907; eLIBRARY SPIN 2038-4156
Род Виктор Андреевич / Viktor A. Rod ORCID 0009-0008-8333-4749; eLIBRARY SPIN 5509-7202
Савельева Ольга Александровна / Olga A. Saveleva ORCID 0009-0004-5645-6637; eLIBRARY SPIN 7954-9281

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2611
https://elibrary.ru/IBKBFD

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Субстанции из пантов марала (*Cervus elaphus sibiricus*), полученные путем фракционирования – перспективный ингредиент для производства функциональных продуктов

М. Г. Кротова[1,*], С. М. Сафронов[2], И. Н. Гришаева[1], А. А. Неприятель[1]

[1] *Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, Барнаул, Россия*

[2] *ООО «Вистерра», с. Алтайское, Россия*

Поступила в редакцию: 04.07.2025
Принята после рецензирования: 31.08.2025
Принята к публикации: 02.09.2025

**e-mail: otdel_wniipo@mail.ru*

© М. Г. Кротова, С. М. Сафронов, И. Н. Гришаева, А. А. Неприятель, 2025

Аннотация.
Панты – неокостеневшие рога оленей, снятые в период роста, распространенное сырье для изготовления биологически активных добавок с доказанным профилактическим и лечебным действием. Для расширения возможности применения пантовой продукции в составе функционального питания предлагается использование технологии разделения сырого панта на фракции. Цель исследования – оценить биохимический состав субстанций из пантов марала (*Cervus elaphus sibiricus*), полученных путем фракционирования.
Материалом исследования послужили сырые панты марала. Сырье фракционировали посредством перколяции, высокотемпературного гидролиза и субкритической экстракции. Все пробы высушивали до влажности 5–10 %. В представленных образцах определяли массовую долю органических и минеральных веществ, массовую концентрацию макро- и микроэлементов, аминокислот, жирнокислотный состав, молекулярно-массовое распределение фракций пептидов.
В кровяной и хрящевой субстанциях преобладала белковая фракция (74,29–80,59 %) высокой биологической ценности с показателями аминокислотного скора по треонину, фенилаланину, изолейцину и триптофану от 97 до 227 %. Анализ пептидных фракций показал наличие низкомолекулярных пептидов массой < 2,9 кДа с преобладающим их количеством в составе хрящевой субстанции. По минеральным компонентам показано преобладание кальция (16590,00 мг/100 г), натрия (799,10 мг/100 г), магния (319,80 мг/100 г) и цинка (6,40 мг/100 г) в составе субстанции из крови и лимфы; калия (408,60 мг/100 г) и железа (54,30 мг/100 г) в хрящевой фракции. Основу минеральной фракции составляет фосфор в количестве 14000,00 мг/100 г.
На основании данных биохимического состава субстанций из пантов марала (*Cervus elaphus sibiricus*), полученных путем фракционирования, при сравнительной оценке с исходным сырьем показана высокая биологическая ценность, что позволяет установить целесообразность их включения в функциональные продукты питания людей.

Ключевые слова. Марал, субстанция, фракционирование, функциональный продукт, панты, биохимический состав, пептиды, аминокислоты

Финансирование. Научно-исследовательская работа по теме «Разработка нового функционального продукта на основе комплексной биотехнологии переработки сырых пантов маралов в сочетании с лекарственными травами Алтайского края» проведена при государственной поддержке за счет выделяемых средств гранта Управления Алтайского края по пищевой, перерабатывающей промышленности и биотехнологиям (соглашение № 7 от 22.06.2023) и средств ООО «Вистерра», а также Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) в ФГБНУ ФАНЦА.

Для цитирования: Кротова М. Г., Сафронов С. М., Гришаева И. Н., Неприятель А. А. Субстанции из пантов марала (*Cervus elaphus sibiricus*), полученные путем фракционирования – перспективный ингредиент для производства функциональных продуктов. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 819–832. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2611

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2611
https://elibrary.ru/IBKBFD

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

Fractionated Substances from Maral (*Cervus elaphus sibiricus*) Velvet Antlers in Functional Foods

Maria G. Krotova[1,*], Sergey M. Safronov[2], Irina N. Grishaeva[1], Aleksey A. Nepriyatel[1]

[1] *Federal Altai Scientific Center for Agrobiotechnology, Barnaul, Russia*

[2] *Visterra Ltd, Altayskoye, Russia*

Received: 04.07.2025
Revised: 31.08.2025
Accepted: 02.09.2025

**e-mail: otdel_vniipo@mail.ru*

© M.G. Krotova, S.M. Safronov, I.N. Grishaeva, A.A. Nepriyatel, 2025

Abstract.
Velvet antlers are non-ossified antlers of maral (*Cervus elaphus sibiricus*) harvested during the growth phase. They are a common raw material in biologically active supplements with reliable preventive and therapeutic effects. This new technology provides a high-quality fractionation of raw velvet antlers that expands the potential application of velvet antler products in functional foods. The article describes the biochemical profile of substances derived from maral velvet antlers obtained by fractionation.
The raw maral velvet antlers were fractionated using percolation, high-temperature hydrolysis, and subcritical extraction. The samples were dried to a moisture content of 5–10%. The analysis involved the following parameters: proteins, fats, ash, moisture, macro- and microelements, amino acids, fatty acids, and molecular weight distribution of peptide fractions.
The blood and cartilage-derived substances contained a high-value protein fraction (74.29–80.59%) with an amino acid score ranging from 97 to 227% for threonine, phenylalanine, isoleucine, and tryptophan. The analysis of peptide fractions revealed the presence of low-molecular-weight peptides (< 2.9 kDa), with the highest concentration in the cartilage-derived substance. Regarding the mineral composition, the blood and lymph fraction proved to be rich in calcium (16,590.00 mg/100 g), sodium (799.10 mg/100 g), magnesium (319.80 mg/100 g), and zinc (6.40 mg/100 g) while the cartilage contained a lot of potassium (408.60 mg/100 g) and iron (54.30 mg/100 g). Phosphorus was the predominant element across all mineral fractions, with a concentration of 14,000.00 mg/100 g.
The biochemical composition of the substances fractionated from maral (*Cervus elaphus sibiricus*) velvet antlers demonstrated a high biological value and a strong potential for the functional food industry.

Keywords. *Cervus elaphus sibiricus*, substance, fractionation, functional product, antlers, biochemical composition, peptides, amino acids

Funding. The work was part of State Assignment to the Administration for the Food Industry and Biotechnologies, Altai Region (Agreement No. 7, June 22, 2023): New functional products based raw maral antlers and medicinal herbs of the Altai Region, with financial support from Visterra Ltd and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, and the Altai Federal Scientific Center for Agrobiotechnology.

For citation: Krotova MG, Safronov SM, Grishaeva IN, Nepriyatel AA. Fractionated Substances from Maral (*Cervus Elaphus Sibiricus*) Velvet Antlers in Functional Foods. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):819–832. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2611

Введение

Проблемы питания населения становятся все более актуальными, поскольку еда – ключевой элемент в регулировании здоровья и болезней человека [1]. Согласно мировой статистике смертей, в год от неоптимального рациона умирает 11 млн человек [2]. Существуют исследования влияния нутритивного статуса на физическое, психическое, функциональное здоровье [3] и на когнитивные способности пожилых людей [4]. Посредством научных работ в области нутригеномики выявлена роль питания в комплексной регуляции метаболических процессов и микробиома, что имеет прямое значение для профилактики заболеваний [5]. В связи с этим использование в составе пищи натуральных ингредиентов, содержащих минорные вещества с биологической активностью, является одним из важнейших направлений в пищевой промышленности. Продукты, которые, помимо основной питательной ценности, имеют определенное влияние на здоровье, называются функциональными [6]. Появляется все больше доказательств

того, что присутствие активных веществ в продуктах функциональной направленности может регулировать физиологическую активность и способствовать укреплению здоровья человека [7]. Например, углеводы и электролиты добавляют в напитки для предотвращения обезвоживания, связанного с физической нагрузкой [8]. Chakrabarti *et al.* изучали способность функциональной пищи предотвращать некоторые хронические заболевания, такие как ожирение, болезни сердца, диабет 2 типа и некоторые виды рака [9].

Среди огромного разнообразия функциональных ингредиентов растительного и животного происхождения особое место занимают панты оленей, эффективность применения которых при различных патологических состояниях неоднократно доказана в трудах как российских, так и зарубежных исследователей [10–12]. Они – единственный в мире комплекс животного происхождения, обладающий мощным профилактическим, оздоравливающим действием, а также признанное целесообразное для получения лекарств сырье [13].

Панты – неокостеневшие рога, снятые в период роста [14], уникальный орган для млекопитающих, демонстрирующий цикл полной ежегодной регенерации [15]. Гистология показывает, что пант состоит из нескольких тканей, таких как бархатистая кожа, хрящи, кости, нервы и кровеносные сосуды [16].

Благодаря своей структуре и строению панты имеют уникальный химический состав. К важным биологически активным ингредиентам пантов благородного оленя относятся водорастворимые белки [17]. На сегодняшний день из пантов марала изготавливают различные формы профилактических и лекарственных препаратов в виде экстрактов, капсул, таблеток, отличающихся высокой стоимостью и доступных ограниченному числу людей. Панты в составе продуктов питания могут придать им определенные функциональные свойства, обогатить важными биологически активными компонентами и в конечном итоге позволят расширить круг потребителей здоровой продукции.

Высокая биологическая активность и биохимический состав пантов марала позволяют оценить его как возможный ингредиент для функциональных продуктов. Однако использование нативного пантового продукта в составе пищи затруднительно вследствие плохой растворимости и усвояемости.

Перспективным направлением переработки пантовой продукции является фракционирование сырья, основанное на разделении наименее стабильных биологически активных веществ на группы, близкие по своей химической природе. Разделение фракций происходит по принципу растворимости в средах переменной полярности и при разных условия, что, в свою очередь, является функцией их химических свойств. Возможность дальнейшего применения пантовых субстанций, полученных путем фракционирования, опосредована рентабельностью при производстве благодаря безотходной технологии, а следовательно – и снижением затрат себестоимости. Получение различных видов субстанций из пантов позволит расширить сферу их дальнейшего использования в составе пищевых и продуктов функциональной направленности.

Важно продолжать изучение отдельных минорных компонентов, поскольку фармакологический и саногенетический потенциал биологических препаратов связан с их биохимическим составом, анализ которого позволит не только определить преимущество предлагаемого способа переработки пантов, но и выявить возможность их дальнейшего применения.

Цель исследования – оценить биохимический состав субстанций из пантов марала, полученных путем фракционирования.

Объекты и методы исследования

Научно-исследовательская работа проводилась во Всероссийском научно-исследовательском институте пантового оленеводства ФГБНУ «Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий» и ООО «Вистерра» в 2023 г.

В качестве материала исследования использовали сырые панты марала (*Cervus elaphus sibiricus*). Образцы отобраны в период с 15 июня по 15 июля 2023 г. от 5 клинически здоровых самцов маралов.

Для транспортировки от маралофермы до лаборатории сырье замораживали при –20 °С, дефростировали, промывали в струе холодной воды, удаляли шкуру. Пант нарезали на слайсы, а шкуру измельчали на мясорубке. Затем высушивали до влажности 5–10 % с применением вакуумно-импульсной сушки при температуре 50 °С и измельчали до порошкообразного состояния с размером частиц 0,10–1,15 мкм (проба № 1 – нативный порошок из панта; проба № 2 – нативный порошок из шкуры панта). Из оставшегося материала получали субстанции путем разделения панта на фракции. Посредством перколяции экстрагировали кровяную субстанцию. Далее пант подвергали высокотемпературному гидролизу, который позволял выделить в водный экстракт органическую составляющую рога, с помощью фильтрации отделяли неорганическую его часть. Из шкуры панта в совокупности с субкритической экстракцией и органическими растворителями получали жировую составляющую. На следующем этапе проводили концентрирование экстрактов на вакуум-выпарных аппаратах различной производительности от 0,5 до 25,0 л/ч с последующим высушиванием до влажности 5–10 % вакуум-импульсными сушильными установками. При фракционировании получены следующие пробы: проба № 3 – субстанция из крови и лимфы, проба № 4 – хрящевая субстанция, проба № 5 – минеральная субстанция, проба № 6 – липидная субстанция.

Во всех представленных образцах определяли химический состав. Показатели влажности и золы определяли в соответствии с ГОСТ 24027.2-80, массовой доли белка – по методу Кьельдаля по ГОСТ 25011-2017,

массовой доли жира – кислотным методом в соответствии с ГОСТ 5867-90. Определение массовой концентрации макро- и микроэлементов – методом атомно-адсорбционной спектроскопии на спектрофатометре Shimadzu AA-7000 (Shimadzu, Япония) по ГОСТ Р ИСО 27085-2012.

Методика определения аминокислот основана на хроматографическом анализе с применением специализированного оборудования (Shimadzu, Япония) с диодно-матричным-детектированием на длине волны 254 нм. В качестве неподвижной фазы использовали колонку на основе селикогеля и диоксида кремния (C_{18}) с диаметром частиц 5 микрон размером 250×4,6 мм (MZ-Analysentechnik GmbH, США). Хроматографический анализ осуществлялся в градиентном режиме при расходе элюента 1,0–1,2 мл/мин и температуре термостата колонки 40 °С. В качестве подвижной фазы брали смесь 6 мМ раствора ацетата натрия с pH 5,50 (компонент А), раствор 2-пропанола концентрацией 1 % в ацетонитриле (компонент В) и 6 мМ раствор ацетата натрия с pH 4,05 (компонент С).

Определение массовой доли метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК) проводили методом газовой хроматографии по ГОСТ 31663-2012.

Статистическую обработку результатов биохимического состава осуществляли путем расчета средних значений 5 параллельных определений ($\bar{X}$) и ошибки среднего значения (s) программой MS Excel в соответствии с материалами Н. И. Коростелевой [18]. Разница средних значений считалась достоверно значимой при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Ценность пантов оленей определяет, прежде всего, их химический состав. Согласно предыдущим исследованиям, их биохимия может варьировать в зависимости от таких факторов, как вид оленей [19], вес пантов, живая масса [20] и стадия роста панта [21].

В течении многих лет проводятся исследования различных способов извлечения биологически активных компонентов из пантов, например, ферментация [22], водная [23] и спиртовая экстракция [24], которые в значительной мере отличаются по действию на организм из-за разного количества содержания БАВ.

Проведен анализ химического состава пантов сибирского марала (табл. 1).

Нативный порошок из пантов характеризовался высоким содержанием как белковых, так и зольных компонентов, процентное соотношение которых достоверно не отличалось. Полученные данные согласуются с источником [25], в котором упоминалось, что панты содержат более 50 % сухой массы белка. В нативном порошке из кожи отмечено преобладающее содержание белка и минимальный уровень зольных элементов. Жировая фракция представлена в составе пантов в незначительном количестве, причем основная ее часть сконцентрирована в коже.

Процесс фракционирования способствовал разделению групп макронутриентов на отдельные биосубстанции. Процессы перколяции и высокотемпературного гидролиза способствовали экстрагированию из ткани рога порядка 85 % белковых компонентов, при этом в субстанции из крови и лимфы и хрящевой субстанции достоверных отличий в количественном содержании белка не выявлено. Часть протеиновых компонентов переходила в состав минеральной и липидной субстанции в количестве 15,0 и 4,0 % соответственно. При фракционировании пантов до 78,8 % зольных веществ перешло в состав минеральной субстанции; 11,2 % экстрагировалось в образец из крови и лимфы; а 1,7 % – в хрящевую субстанцию.

Применение субкритической экстракции кожи панта с использованием органических растворителей способствовало получению максимального количества извлекаемого компонента при минимальной концентрации дополнительных примесей. Массовая доля жира в липидной субстанции составляла до 95 %.

При решении следующей задачи проведено изучение значений аминокислот в субстанциях из пантов марала (табл. 2).

Исходя из анализа данных по химическому составу пантов следует, что среди представленных групп веществ особого внимания заслуживает белковая составляющая. К основным биологически активным компонентам пантов относятся полипептиды и белки [26]. Огромное влияние на биологическую активность оказывают свободные аминокислоты, каждая из которых является не только исходным продуктом в процессе биосинтеза белковых веществ, белковоподобных витаминов и гормонов, но и сама при этом претерпевает сложные биохимические превращения. Изучение состава белковой фракции пантовой продукции важно

Таблица 1. Химический состав субстанций из пантов марала

Table 1. Substances from maral velvet antlers: Chemical composition

Химический состав ($\bar{X}$ ± s), г/100 г	Пробы субстанции					
	Проба № 1 (n = 5)	Проба № 2 (n = 5)	Проба № 3 (n = 5)	Проба № 4 (n = 5)	Проба № 5 (n = 5)	Проба № 6 (n = 5)
Массовая доля белка	49,85 ± 3,99	76,3 ± 6,10	80,59 ± 6,45	74,29 ± 5,94	15,36 ± 2,30	4,15 ± 0,62
Массовая доля жира	0,76 ± 0,15	8,07 ± 0,50	0,25 ± 0,07	0,31 ± 0,01	0,99 ± 0,02	95,30 ± 3,03
Массовая доля золы	42,83 ± 2,80	4,11 ± 0,36	11,23 ± 1,16	1,73 ± 0	78,82 ± 1,07	1,85 ± 0,59
Массовая доля влаги	7,73 ± 0,19	7,92 ± 0,20	6,49 ± 0,16	5,76 ± 0,14	3,62 ± 0,09	7,06 ± 0,18

Таблица 2. Состав аминокислот субстанций из пантов

Table 2. Amino acids from maral velvet antlers

Массовая доля аминокислоты ($\bar{X}$ ± s), г/100 г	Пробы субстанции				
	Проба № 1 (n = 5)	Проба № 2 (n = 5)	Проба № 3 (n = 5)	Проба № 4 (n = 5)	Проба № 5 (n = 5)
Аспарагиновая кислота	0,68 ± 0,03	0,94 ± 0,05***	1,49 ± 0,08	1,20 ± 0,06	0,63 ± 0,15*
Аланин	2,07 ± 0,11	4,60 ± 0,23***	3,73 ± 0,21	4,38 ± 0,25	1,14 ± 0,56**
Глутаминовая кислота	2,03 ± 0,10	3,54 ± 0,18***	3,97 ± 0,19	3,27 ± 0,16	0,59 ± 0,12***
Гидроксипролин	1,93 ± 0,20	2,76 ± 0,63	0,16 ± 0,01	5,31 ± 1,24***	1,11 ± 0,67*
Пролин	3,90 ± 0,15	5,76 ± 0,29**	4,86 ± 0,28	4,15 ± 0,22	1,24 ± 0,96*
Глицин	4,53 ± 0,25	8,71 ± 0,95**	3,64 ± 0,18	3,17 ± 0,16	2,06 ± 1,03
Серин	1,08 ± 0,02	2,73 ± 0,19***	5,20 ± 0,30	4,79 ± 0,24*	1,38 ± 0,87*
Цистин	0,30 ± 0,01	0,15 ± 0,08	0,63 ± 0,03	0,70 ± 0,01	0,07 ± 0,10***
Тирозин	2,10 ± 0,25	2,94 ± 0,13	2,54 ± 0,13	2,25 ± 0,11	0,70 ± 0,12***
Метионин	0,88 ± 0,11	0,90 ± 0,15	0,66 ± 0,03	0,94 ± 0,06**	0,90 ± 0,25
Фенилаланин	1,20 ± 0,06	1,25 ± 0,08	3,71 ± 0,19	3,30 ± 0,05	0,60 ± 0,34***
Лизин	0,52 ± 0,03	0,50 ± 0,10	4,00 ± 0,20	0,42 ± 0,17***	0,24 ± 0,10
Треонин	1,48 ± 0,07	3,00 ± 0,19***	2,55 ± 0,13	2,25 ± 0,01	0,34 ± 0,15***
Триптофан	0,68 ± 0,03	0,54 ± 0,09	1,31 ± 0,07	1,19 ± 0,13	0,24 ± 0,12***
Валин	0,76 ± 0,04	1,56 ± 0,15**	2,19 ± 0,11	1,79 ± 0,06***	0,36 ± 0,20***
Лейцин	1,99 ± 0,11	3,98 ± 0,22***	0,55 ± 0,03	2,43 ± 0,09***	1,09 ± 0,67
Изолейцин	1,84 ± 0,09	1,60 ± 0,08	5,86 ± 0,25	4,66 ± 0,12**	0,96 ± 0,54**
Аргинин	0,34 ± 0,02	0,69 ± 0,03***	1,16 ± 0,06	1,01 ± 0,23	0,54 ± 0,32
Гистидин	2,17 ± 0,12	4,60 ± 0,56**	2,04 ± 0,03	1,49 ± 0,05	0,34 ± 0,17**
Сумма аминокислот	30,48 ± 1,25	50,93 ± 2,54***	50,25 ± 1,12	48,70 ± 0,95**	14,53 ± 2,76***

Примечание: *$p < 0,05$; **$p < 0,01$; ***$p < 0,001$ – разница достоверна в сравнении с предыдущим значением.

Note: *$p < 0.05$; **$p < 0.01$; ***$p < 0.001$ – reliable difference from the previous value.

для расширения сфер его применения в продуктах питания функциональной направленности. При этом аминокислотный состав может значительно отличаться в зависимости от вида субстанции. Поскольку содержание протеина в липидной субстанции составляло менее 5 %, дальнейшее исследование аминокислотного состава данной фракции не проводилось, т. к. при суточной потребности человека в белке (65–75 г/сутки) применение ее в качестве белкового компонента функциональных продуктов нецелесообразно.

В пантах марала определено 19 аминокислот, общая их сумма в нативном порошке составила 30,48 г/100 г. В субстанциях, полученных при фракционировании, данный показатель увеличивался в 1,5–1,7 раза, за исключением минеральной фракции. В коже панта (нативный порошок) общее содержание аминокислот в 1,7 раза выше, чем в теле панта (проба № 1).

В нативных пробах (№ 1, № 2) преобладали пролин, глицин, аланин и глутаминовая кислота, составляющие 41–44 % от общего количества аминокислот. Высокое содержание пролина и глицина характерно для коллагена [27], в большом количестве присутствующего в соединительной и костной тканях пантов [28]. В свою очередь, значительный уровень глутаминовой кислоты связан с тем, что, по мнению ряда авторов, ее остатки, несущие отрицательный электрический заряд, участвуют в связывании коллагена, а также гидроксиапатита в костном матриксе за счет притягивания положительно заряженных ионов кальция и фосфата [29]. В нативном порошке из кожи панта (проба № 1) также отмечено значительное количество гистидина и лейцина.

Количественное содержание отдельных аминокислот варьировало в зависимости от способа экстракции. Достоверные результаты выявлены по концентрации серина, лизина, валина, изолейцина, метионина, лейцина и гидроксипролина. Наиболее значимые отличия установлены по концентрации гидроксипролина: его уровень в хрящевой субстанции в 33,0 раза выше, чем уровень субстанции из крови и лимфы. Гидроксипролин – уникальная для коллагена аминокислота, играющая важную роль в стабилизации структуры тройной спирали [30]. В пантах идентифицирован коллаген I, II, X и XI типов [31]. Для разрушения молекулы коллагена необходимо создание определенных условий, в частности применялась высокая температура гидролиза.

Значительная разница установлена по лизину, количество которого в субстанции из крови и лимфы в 9,5 раз выше, чем в хрящевой. В составе животных тканей наиболее богат лизином гемоглобин, полностью извлекаемый в процессе перколяции.

В ходе анализа аминокислотного состава важен не только учет количественных показателей, но и соотношений, характеризующих сбалансированность и биологическую ценность. Для выражения биологической ценности белковой составляющей продуктов существует общепризнанный метод аминокислотного скора, основанный на сравнении аминокислотного состава исследуемого продукта с эталонным белком [32]. В таблице 3 приведены основные показатели биологической ценности белковой составляющей субстанций из пантов марала с учетом эталонных значений незаменимых аминокислот по шкале ФАО/ВОЗ [33].

В белке всех представленных образцов лимитирующими были валин, лейцин, метионин и лизин. В нативном порошке из пантов и в хрящевой субстанции минимальный скор отмечен по лизину, в субстанции из крови и лимфы – по лейцину. Высокие значения скора – по треонину, фенилаланину, изолейцину, триптофану и гистидину. Применение процесса перколяции и высокотемпературного гидролиза способствовало увеличению концентрации изолейцина на 70–97 % по сравнению с нативным порошком из пантов. Концентрация гистидина, напротив, при фракционировании снижалась в среднем на 41–53 %.

Анализ аминокислотного состава пантов марала показал, что как нативный порошок, так и субстанции, полученные на их основе, не являются сбалансированными продуктами по аминокислотам. Но наличие высоких концентраций отдельных незаменимых аминокислот позволяет положительно оценить перспективу применения субстанций из пантов марала в качестве дополнительного ингредиента в составе белковых функциональных продуктов для обогащения их триптофаном, изолейцином, фенилаланином и гистидином.

Несмотря на несбалансированность, наличие каждой из аминокислот в составе пантовой продукции имеет значение как показатель биологической активности. Особенно важно присутствие определенных последовательностей аминокислот, образующих так называемые пептиды. Это небольшие фрагменты белков, полученные из растений, животных и микроорганизмов, биологическая активность которых зависит от молекулярной массы, аминокислотного состава [34, 35].

Имеются данные об антидиабетических [36], антигипертензивных [37], антимикробных [38], противораковых [39], противовирусных [40] свойствах различных пептидов. Показаны результаты исследования ингибирующей ксантиноксидазной активности аминокислотных последовательностей длиной от 4 до 7 аминокислот [41]. Их фармакологические эффекты достигаются за счет различных механизмов действия, таких как активация или ингибирование клеточной поверхности, внутриклеточных рецепторов и ферментов, модуляция белок-белковых взаимодействий и т. д. [42].

Биологически активные пептиды находят широкое применение в составе специализированных пищевых продуктов, в частности в спортивном питании [43], функциональных продуктах [44].

Пептиды представляют собой молекулы на основе 2–50 аминокислот [45]. При этом биологически активные пептиды состоят из аминокислотных остатков в количестве менее 20 и имеют молекулярную массу ниже 10 кДа [46]. Пептиды с размером молекулы менее 3 кДа имеют наибольшую биологическую активность.

Активные пептиды с низким молекулярным весом обладают более высокой биодоступностью, поскольку они легко проникают через желудочно-кишечные мембраны и кожные барьеры [47].

На сегодняшний день представлены различные исследования по выделению пептидов из пантов. В частности, Suttie *et al.* определили наличие в неоссифицированных областях рогов оленей пептида IGF-1, основного фактора роста хряща [48], имеющего молекулярную массу 7,6 кДа. Zhao *et al.* идентифицировали четыре противовоспалительных пептида в гидролизатах белков пантов: VH (Val–His), LAN (Leu–Ala–Asn), AL (Ala–Leu) и IA (Ile–Ala) [49].

В продуктах переработки пантов марала как потенциального источника пептидов содержатся активные и неактивные пептидные молекулы.

Таблица 3. Биологическая ценность белковой составляющей субстанций из пантов марала

Table 3. Proteins from maral velvet antlers: Biological value

Аминокислота	Проба № 1		Проба № 2		Проба № 3		Проба № 4	
	А	АКС	А	АКС	А	АКС	А	АКС
Треонин	2,97	95	3,93	127	3,16	102	3,02	97
Валин	1,52	35	2,04	47	2,72	63	2,41	56
Фенилаланин + Тирозин	6,60	127	4,33	83	7,75	149	7,47	144
Изолейцин	3,69	115	2,10	66	7,27	227	6,27	196
Лейцин	3,99	60	5,22	79	0,68	10	3,27	50
Метионин + цистин	2,37	88	2,82	104	1,60	59	2,21	82
Триптофан	1,36	160	0,71	84	1,62	190	1,60	188
Лизин	1,04	18	0,66	12	4,96	87	0,56	10
Гистидин	4,30	215	6,02	301	2,53	127	2,00	100

Примечание: А – содержание аминокислоты, г/100 г белка; АКС – аминокислотный скор.

Note: A – amino acid content, g/100 g protein; AKC – amino acid score.

В ходе научного исследования определено распределение пептидных фракций по молекулярным массам в зависимости от вида субстанции (рис. 1, 2).

В нативном порошке из пантов марала и кожи пантов основная часть белковых компонентов представлена высокомолекулярными пептидами в пределе масс более 6 кДа. Низкомолекулярные пептиды менее 3 кДа составляли не более 4–5 %.

При переработке и фракционировании пантов наблюдалось изменение процентного соотношения пептидов. Для хрящевой субстанции характерно нарастание процентного содержания пептидов с меньшей молекулярной массой. Так, 33,8 % белковой составляющей приходилось на пептиды с молекулярной массой < 2,9 кДа, а 20,9 % – на пептиды массой от 2,9 до 6,4 кДа. Данная тенденция свидетельствует о гидролитическом расщеплении белка при высокотемпературном гидролизе.

В субстанции из крови и лимфы панта основная масса пептидов находилась в среднем интервале молекулярных масс, в частности 26,7 % составляли пептиды 56,5–22,5 кДа и 37,6 % – пептиды с массой 22,5–11,7 кДа. На долю низкомолекулярных пептидов с массой менее 6,4 кДа приходилось 10,1 % белковой составляющей, из них 5,6 % составляли пептиды менее 3 кДа.

Данные исследования согласуются с результатами, представленными в литературе. Например, Ма *et al*. определили, что молекулярная масса пептидов роговой крови в основном распределена в диапазоне молекулярных масс около 55 кДа [50]. Нао *et al*. получали низкомолекулярные пептиды с антиоксидантной, антилипоксигеназной и антитирозиназной активностями за счет ферментативного расщепления крови с применением щелочной протеазы [51].

Таким образом, согласно проведенному исследованию, степень гидролиза выше в хрящевой субстанции,

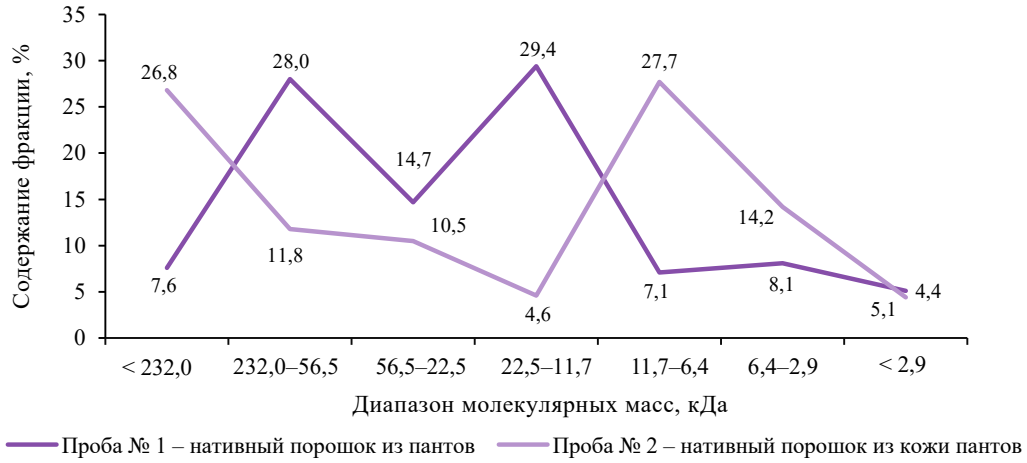


Рисунок 1. Молекулярно-массовое распределение пептидных фракций в составе нативного сырья из пантов марала

Figure 1. Peptide fractions in native raw materials from maral velvet antlers: Molecular weight distribution



Рисунок 2. Молекулярно-массовое распределение пептидных фракций в составе субстанций из пантов марала

Figure 2. Peptide fractions in substances from maral velvet antlers: Molecular weight distribution

о чем свидетельствует наличие большего количества пептидов низкой молекулярной массы. Следовательно, хрящевая субстанция по содержанию биологически активных пептидов превосходит другие биосубстанции из пантов марала. Вопрос оценки качественного состава пептидов субстанций из пантов марала и определения их функциональной активности остается открытым, актуальным и требует дальнейших исследований.

Проведено исследование минерального состава биосубстанций из пантов марала (табл. 4).

Отмечено доминирование образцов пантов по содержанию кальция. В нативном порошке его уровень составил 28730 мг/100 г. В процессе фракционирования основная масса кальция перешла в состав субстанции из крови и лимфы в количестве 58 % от массы кальция, содержащегося в нативном порошке пантов. Кровь играет важную роль в поддержании потока минералов и ферментов, необходимых для роста рогов, что определяет высокую концентрацию минерала в субстанции из крови и лимфы [52]. Различия в соотношении минеральных компонентов в субстанциях из пантов также связаны с процессом роста и окостенения рогов. Существует гипотеза о трех стадиях, связанных с кальцификацией рогов, включающих первоначальное накопление промежуточных минералов в хрящах, реминерализацию промежуточных минералов с перестройкой коллагеновых фибрилл и созревание из реминерализованных минералов в термодинамически стабильные структуры. В процессе роста рогов ионы минералов соединяются с хондроитинсульфатом и откладываются на хрящевой матрице. По мере накопления минеральных компонентов хрящевая ткань постепенно заменяется на костную [53]. Срезка пантов для получения максимального количества биологически активных веществ осуществляется на стадии интенсивного роста, до наступления окостенения, поэтому основная масса ионов минералов, в том числе кальция, еще находится в кровяной и хрящевой составляющих рога. Данные подтверждаются высоким содержанием в составе субстанций других макроэлементов, таких как калий, магний, натрий, при минимальном уровне в составе минеральной фракции.

Фосфор в пантах марала (нативный порошок) содержался в количестве 5500 мг/100 г, что в 5 раз ниже уровня кальция. При фракционировании основная часть минерала входила в состав минеральной субстанции, включающей в основном фосфор, концентрация которого выше по сравнению с субстанциями из крови и лимфы и хрящевой в 38 и 64 раза соответственно. Результаты исследования согласуются с данными исследователей, утверждающих, что соотношение кальция и фосфора различается во время минеральной фазы. Фосфор содержится в основной массе в костной части рога в виде фосфата кальция, составляющего до 48 % минерального компонента [54].

Значительные показатели уровня макроэлементов в составе субстанции из крови и лимфы связаны и со способом экстрагирования. Первая стадия фракционирования включала перколяцию, основанную на непрерывной фильтрации экстрагента через сырье. В ходе процесса извлекаемые компоненты переходят в состав экстрагента в результате диффузии, протекающей из-за разницы концентраций экстрагируемых веществ [55]. Данный способ экстракции способствовал значительному вымыванию минералов из ткани рога, о чем свидетельствует минимальное их содержание в составе минеральной фракции.

Из числа микроэлементов в пантах в превалирующем количестве отмечены железо, медь, максимальное количество которых содержалось в составе липидной и хрящевой субстанции, а также цинк при максимальном его уровне в липидной субстанции. Недавние

Таблица 4. Минеральный состав субстанций из пантов марала

Table 4. Substances from maral velvet antlers: Mineral composition

Минеральный состав ($\bar{X}$ ± s), г/100 г	Пробы субстанции					
	Проба № 1	Проба № 2	Проба № 3	Проба № 4	Проба № 5	Проба № 6
Кальций	28730,00 ± 50,60	1090,00 ± 87,20	16590,00 ± 83,60	145,80 ± 6,21	55,39 ± 2,77	79,00 ± 0,03
Фосфор	5500,00 ± 17,60	1300,00 ± 25,00	370,00 ± 22,20	220,00 ± 11,00	14000,00 ± 98,21	15,000 ± 0,010
Калий	5,90 ± 0,50	473,70 ± 23,65	256,90 ± 12,80	408,60 ± 20,40	0,41 ± 0,11	90,00 ± 0,03
Магний	610,90 ± 31,50	104,00 ± 5,20	319,80 ± 15,95	48,42 ± 7,07	4,72 ± 0,24	0,02 ± 0,01
Натрий	238,40 ± 21,40	1368,00 ± 98,44	799,10 ± 63,90	632,80 ± 44,24	7,79 ± 1,15	19,00 ± 0,01
Железо	4,90 ± 0,70	65,66 ± 7,22	15,92 ± 1,16	54,30 ± 2,72	*	46,00 ± 13,00
Марганец	0,10 ± 0,01	0,42 ± 0,11	0,03 ± 0,01	1,11 ± 0,05	*	*
Медь	0,10 ± 0,03	0,02 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,44 ± 0,11	*	40,00 ± 14,00
Цинк	10,30 ± 0,31	1,78 ± 0,52	6,40 ± 0,87	2,80 ± 0,06	*	38,00 ± 10,00
Хром	0,02 ± 0,01	2,40 ± 0,65	0,14 ± 0,02	0,31 ± 0,08	*	1,80 ± 0,90
Йод	0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,11	0,07 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,01	*

Примечание: * – концентрация ниже пороговых значений диапазона количественного определения; $p < 0,05$.

Note: * – concentration below threshold values; $p < 0.05$.

исследования показали, что быстрые темпы роста рогов оленей связаны с экспрессией прото-онкогенов. Профили экспрессии генов рога имели более высокую корреляцию с остеосаркомой (*p* 0,67–0,78), чем с нормальным ростом костных тканей (*p* 0,33–0,47) [56]. Ввиду быстрой скорости пролиферации клетки растущих рогов имеют повышенную потребность в железе. Аналогично раковым клеткам, демонстрирующим более высокий уровень поглощения и использования железа по сравнению со здоровыми клетками [57]. Хондроитинсульфат, входящий в состав пантового хряща, обладает способностью к хелатированию переходных металлов, таких как Cu^{2+} и Fe^{2+} [58], что обуславливает высокое содержание железа в хрящевой субстанции. Максимальное количество железа обнаружено в составе нативного порошка из кожи пантов.

Высокое содержание меди в составе липидной фракции, вероятно, связано с технологическим процессом, заключающемся в применении органического растворителя в качестве экстрагента, который способствует более полному извлечению меди из сырья.

Таким образом, по результатам оценки зольной составляющей пантов марала и субстанций, полученных на их основе, можно заключить, что вид экстракции в значительной степени влияет на соотношение минеральных компонентов в составе субстанции. Процесс перколяции и высокотемпературного гидролиза способствовал максимальному извлечению практически всех зольных компонентов из сырья, кроме фосфора, в основном идентифицированного в составе минеральной фракции.

На следующем этапе исследования проведено изучение жирнокислотного состава субстанций из пантов марала (рис. 3, табл. 5).

Липиды являются одним из важнейших веществ пантов. Многие исследователи отводят особую роль липидной фракции, компоненты которой проявляют различную биологическую активность, например, противовоспалительную, иммуномодулирующую и антимикробную [59]. При оценке биологической активности липидов важным показателем является соотношение жирных кислот.

В субстанциях из пантов марала определено 38 жирных кислот. В преобладающем количестве представлены пальметиновая, стеариновая и олеиновая, составляющие 44–76 % от общего числа метиловых эфиров.

Из общего числа представленных жирных кислот значительно представлены следующие: олеиновая в количестве 7–15 % (в зависимости от вида фракции) и арахидоновая в количестве 2–10 %.

При оценке качества пищевых и функциональных продуктов к важным критериям относится сбалансированность липидного компонента получаемого продукта по жирнокислотному составу, расчет которой проводится исходя из соотношения насыщенных и ненасыщенных жиров. Ненасыщенные жиры преобладали во всех видах субстанций, исключение составляет хрящевая компонента. Во фракции из крови и лимфы полиненасыщенные жиры присутствовали в количестве 34,71 %, мононенасыщенные – 28,44 %, при этом отмечено преобладание омега-6 жирных кислот, что обеспечивает высокую ценность жировой составляющей субстанции. В хрящевой субстанции в большем количестве присутствовали насыщенные жиры, составляющие 64,56 %, тогда как на долю мононенасыщенных жиров приходилось 26,13 % жирных кислот.

Нативный порошок из кожи панта и жировая субстанция характеризовались схожим соотношением метиловых эфиров с преобладанием мононенасыщенных жиров (34,57 %) и значительной концентрацией омега-6 жирных кислот. В соответствии с анализом биохимического состава рогов марала определено, что основная часть жировой составляющей сосредоточена в коже, поэтому из нее проводили выделение липидного компонента при фракционировании, что объясняет аналогичность их состава.

Таким образом, результаты исследования жирнокислотного состава субстанций из пантов марала показали биологическую ценность жировой составляющей, обусловленную наличием эссенциальных жирных кислот, таких как линолевая, линоленовая и арахидоновая, что опосредует возможность их дальнейшего применения в составе функциональных продуктов.

Выводы

На основании данных биохимического состава субстанций из пантов марала (*Cervus elaphus sibiricus*), полученных путем фракционирования, при сравнительной оценке с исходным сырьем показана высокая биологическая ценность, что определяет перспективы их дальнейшего применения в составе функциональных продуктов питания.

В субстанциях из пантов марала, полученных путем фракционирования с применением различных технологических приемов, а также в нативном сырье (сырые панты марала) определены вещества белковой, липидной и минеральной природы в количестве 68 компонентов. Среди превалирующих фракций представлен протеин с высоким уровнем скора (от 127 до 227) по таким аминокислотам, как триптофан, изолейцин, гистидин и фенилаланин, что позволяет положительно оценить перспективу их дальнейшего применения в качестве дополнительного ингредиента в составе белковых функциональных продуктов.

Хрящевая субстанция содержит более 50 % низкомолекулярных пептидов, что свидетельствует о высоком биологическом потенциале фракции и перспективности ее дальнейшего применения для оздоровления организма. Остается открытым вопрос оценки качественного состава пептидов субстанций из пантов марала и определения их функциональной активности, что достаточно актуально и требует дальнейшего исследования.

По составу макро- и микроэлементов панты марала характеризуются значительным количеством кальция,

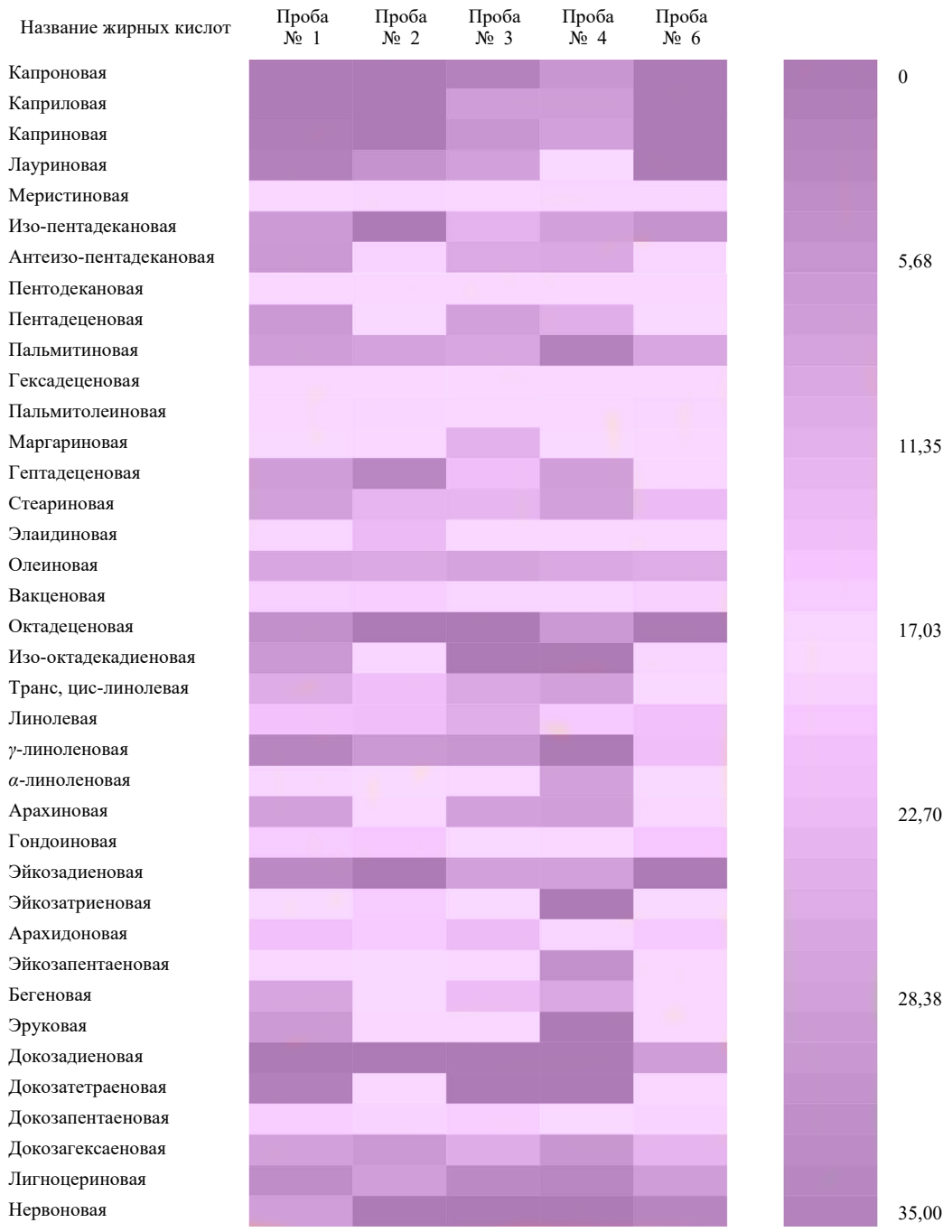


Рисунок 3. Тепловая карта жиронокислотного состава пантов марала

Figure 3. Fatty acids in maral velvet antlers: Thermal map

Таблица 5. Соотношение жирных кислот в субстанциях из пантов марала

Table 5. Fatty acid ratio in substances from maral velvet antlers

Массовая доля жирных кислот, %	Проба № 1	Проба № 2	Проба № 3	Проба № 4	Проба № 6
Насыщенные	47,75	42,26	36,88	64,56	39,95
Ненасыщенные	51,69	58,17	63,15	35,45	58,61
Полиненасыщенные	22,26	22,78	34,71	9,32	21,56
Омега-3	6,18	4,55	7,10	1,64	5,15
Омега-6	16,08	18,23	27,61	7,68	16,41
Мононенасыщенные	29,43	35,39	28,44	26,13	34,57

магния и железа, которые при фракционировании максимально концентрируются в субстанциях: хрящевой и из крови и лимфы. Костно-минеральную субстанцию можно рекомендовать в качестве источника фосфора для обогащения продуктов питания. Функциональность липидной фракции заключается в высоком содержании (58,6 %) поли- и мононенасыщенных жирных кислот.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

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

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Soetedjo NNM. The role of nutrition in various endocrine and metabolic diseases. Clinical Nutrition Open Science. 2025;62:164–188. https://doi.org/10.1016/j.nutos.2025.05.015

2. Lee CD, Hardin CC, Longo DL, Ingelfinger JR. Nutrition in medicine – A new review article series. The New England Journal of Medicine. 2024;390(14):1324–1325. https://doi.org/10.1056/NEJMe2313282

3. Lozada-Martinez ID, Vindas-Meza L, Castelblanco-Toro S, Salazar-Uribe JC, Anaya J. The impact of nutritional status on centenarians physical, mental, and functional health. Clinical Nutrition Open Science. 2025;60:10–20. https://doi.org/10.1016/j.nutos.2025.01.010

4. Feng L, Chu Z, Quan X, Zhang Y, Yuan W, *et al*. Malnutrition is positively associated with cognitive decline in centenarians and oldest-old adults: A cross-sectional study. eClinicalMedicine. 2022;47:101336. https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2022.101336

5. Просеков А. Ю., Веснина А. Д., Любимова Н. А., Чекушкина Д. Ю., Михайлова Е. С. Потребительская геномика: роль в персонализации питания. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 2. С. 400–415. [Prosekov AYu, Vesnina AD, Lyubimova NA, Chekushkina DYu, Mikhailova ES. Consumer genomics in personalized nutrition. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(2):400–415. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2582

6. Yiğit A, Bielska P, Cais-Sokolińska D, Samur G. Whey proteins as a functional food: Health effects, functional properties, and applications in food. Journal of the American Nutrition Association. 2023;42(8):758–768. https://doi.org/10.1080/27697061.2023.2169208

7. Gupta A, Sanwal N, Bareen MA, Barua S, Sharma N, *et al*. Trends in functional beverages: Functional ingredients, processing technologies, stability, health benefits, and consumer perspective. Food Research International. 2023;170:113046. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113046

8. Berry CW, Murray B, Kenney WL. Scientific basis for a milk permeate-based sports drink – A critical review. International Dairy Journal. 2022;127:105296. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105296

9. Chakrabarti S, Guha S, Majumder K. Food-derived bioactive peptides: Production, biological activities, opportunities and challenges. Nutrients. 2018;10(11):1738. https://doi.org/10.3390/NU10111738

10. Wang M, Zhou Z, Wei Y, He R, Yang J, *et al*. Dissecting the mechanisms of velvet antler extract against diabetic osteoporosis via network pharmacology and proteomics. Journal of Ethnopharmacology. 2025;341:119334. https://doi.org/10.1016/j.jep.2025.119334

11. Ding C, Hao M, Ma S, Zhang Y, Yang J, *et al*. Identification of peptides with antioxidant, anti-lipoxygenase, anti-xanthine oxidase and anti-tyrosinase activities from velvet antler blood. LWT. 2022;168:113889. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113889

12. Cao T-Q, An H-X, Ma R-J, Dai K-Y, Ji H-Y, *et al*. Structural characteristics of a low molecular weight velvet antler protein and the anti-tumor activity on S180 tumor-bearing mice. Bioorganic Chemistry. 2023;131:106304. https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2022.106304

13. Сатаева Ж. И., Жетимкаринов Е. Д. Напитки профилактического назначения на основе порошков панты оленей. Norwegian Journal of development of the International Science. 2024. № 140. С. 4–8. [Satayeva ZhI, Zhetimkarinov ED. Preventive drinks based on deer antler powders. Norwegian Journal of development of the International Science. 2024;(140):4–8. (In Russ.)] https://doi.org/10.5281/zenodo.13768163

14. Казанцев Д. А., Растопшина Л. В. Характеристика стада маралов алтае-саянской породы в СПК ПЗ «Абайский». Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 5. С. 88–92. [Kazantsev DA, Rastopshina LV. The features of the altai-sayan maral herd in the SPK PZ “Abayskiy”. Bulletin of Altai State Agricultural University. 2021;(5):88–92. (In Russ.)]

15. Sui Z, Sun H, Weng Y, Zhang X, Sun M, *et al*. Quantitative proteomics analysis of deer antlerogenic periosteal cells reveals potential bioactive factors in velvet antlers. Journal of Chromatography A. 2020;1609:460496. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.460496

16. Chen Y, Zhang Z, Jin W, Li Z, Bao C, *et al*. Integrative analyses of antler cartilage transcriptome and proteome of gansu red deer (*Cervus elaphus kansuensis*) at different growth stages. Animals. 2022;12(7):934. https://doi.org/10.3390/ani12070934

17. Yao B, Zhou Z, Zhang M, Leng X, Zhao D. Investigating the molecular control of deer antler extract on articular cartilage. Journal of orthopaedic Surgary and Research. 2021;16:8. https://doi.org/10.1186/s13018-020-02148-w

18. Коростелева Н. И., Кондрашкова И. С., Рудишина Н. М., Камардина И. А. Биометрия в животноводстве. Барнаул: АГАУ; 2009. 210 с. [Korosteleva NI, Kondrashkova IS, Rudishina NM, Kamardina IA. Biometrics in animal farming. Barnaul: AGAU; 2009. 210 p.]

19. Singh RR, Khanna PP, Singh AK, Goyal SP. Elemental characterization of antlers of variours deer species using X-Ray fluorescence (XRF): A tool for forensic examination. Forensic Science International. 2022;332:111172. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2022.111172

20. Orassay A, Sadvokassova D, Berdigaliyev A, Sagintayev A, Myrzagali S, *et al*. Deer antler extract: Pharmacology, rehabilitation and sports medicine applications. Pharmacologycal Research – Modern Chinese Medicine. 2024;10:100316. https://doi.org/10.1016/j.prmcm.2023.100316

21. Jeon B, Kim S, Lee S, Park P, Sung S, *et al*. Effect of antler growth period on the chemical composition of velvet antler in sika deer (*Cervus nippon*). Mammalian Biology. 2009;74(5):374–380. https://doi.org/10.1016/j.mambio.2008.07.005

22. Jang DW, Ameer K, Oh JH, Park MK. Optimization and pretreatment for hot water extraction of Korean deer (*Cervus canadensis* erxleben) velvet antlers. Journal of microbiology and biotechnology. 2020;30(8):1116–1123. https://doi.org/10.4014/JMB.2004.04009

23. Shi M, Li T, Zhao Y, He Z, Zong Y, *et al*. Comparative studies on the chemical composition and pharmacological effects of vinegar-processed antler glue modified from *Lei Gong Pao Zhi Lun* and traditional water-processed antler glue. Journal of Ethnopharmacology. 2024;321:117508. https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.117508

24. Widyowati R, Suciati S, Haryadi DM, Chang H-I, Suryawan IPGN, *et al*. The effect of Rusa unicolor antler deer extracts from East Kalimantan in bone turnover cell models. Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences. 2020;17(4):440–445. https://doi.org/10.4274/tjps.galenos.2019.57805

25. Sui Z, Zhang L, Huo Y, Yukui Z. Bioactive components of velvet antlers and their pharmacological properties. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 2014;87:229–240. https://doi.org/10.1016/j.jpba.2013.07.044

26. López-Pedrouso M, Lorenzo JM, Landete-Castillejos T, Chonco L, Pérez-Barbería FJ, *et al*. Quantitative proteomic analysis of deer antler from two regenerating and mineralizing sections. Biology. 2021;10(7):679. https://doi.org/10.3390/biology10070679

27. Кротова М. Г., Гришаева И. Н. Коллаген, гидролизованный 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

28. Guo H, Zhang Q, Xin L, Zhang H, Wang S. Dietary hydroxyproline promotes collagen deposition in swim bladder through regulating biosynthesis of amino acid: *In-vitro* and *in-vivo* investigations in Nibea coibor. Aquaculture. 2023;573:739614. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739614

29. Krishnan A, Raghu S, Eswaramoorthy R, Perumal G. Biodegradable glutamic acid loaded polycaprolactone nanofibrous scaffold for controlled dentin mineralization. Journal of Drug Delivery Science and Technology. 2025;104:106546. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.106546

30. Lioi M, Tengattini S, Gotti R, Bagatin F, Galliani S. Chromatographic separation by RPLC-ESI-MS of all hydroxyproline isomers for the characterization of collagens from different sources. Journal of Chromatography A. 2024;1720:464771. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2024.464771

31. Rucklidge GJ, Milne G, Bos KJ, Farquharson C, Robins SP. Deer antler does not represent a typical endochondral growth system: Immunoidentification of collagen type X but little collagen type II in growing antler tissue. Comparative Biochemistry and Physiology part B: Biochemistry and Molecular Biology. 1997;118(2):303–308. https://doi.org/10.1016/S0305-0491(97)00171-5

32. Гордынец С. А., Мадзиевская Т. А., Курченко В. П. Новые тенденции в создании пищевых ингредиентов. Материалы семинара с международным участием. Минск: Издательский центр БГУ; 2021. 106 с. [Gordynets SA, Madziyevskaya TA, Kurchenko VP. New Trends in food ingredient development. Proceedings of Seminar with International Participation. Minsk: Izdatelskiy tsentr BGU; 2021. 106 p.]

33. Joint WHO/FAO/UNU Expert Consultation. Protein and amino acid requirements in human nutrition. WHO Technical Report Series. 2007;(935):1–265.

34. Яременко О. Б., Анохина Г. А., Бурьянов А. А. Сустав. Хрящ. Коллаген. Травма. 2020. Т. 21. № 4. С. 6–12. [Yaremenko OB, Anokhina HA, Burianov OA. Joint. Cartilage. Collagen. Trauma. 2020;21(4):6–12. (In Russ.)] https://doi.org/10.22141/1608-1706.4.21.2020.212531

35. Lin L, Li C, Zhang T, Xia C, Bai Q, *et al*. An *in silico* scheme for optimizing the enzymatic acquisition of natural biologically active peptides based on machine learning and virtual digestion. Analytica Chimica Acta. 2024;1298:342419. https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342419

36. Zamudio FV, Hidalgo-Figueroa SN, Ortíz Andrade RR, Hernández Álvarez AJ, Segura Campos MR. Identification of antidiabetic peptides derived from *in silico* hydrolysis of three ancient grains: Amaranth, Quinoa and Chia. Food Chemistry. 2022;394:133479. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133479

37. Chirinos R, Escobar-Mendoza N, Figueroa-Merma A, de Oliveira TV, Guzmán F, *et al*. Evaluation of the antihypertensive and antidiabetic potential of peptides from the globulin fraction of quinoa (*Chenopodium quinoa*) by an *in silico* and *in vitro* approach. International Journal of Food Science and Technology. 2023;58(8):4386–4396. https://doi.org/10.1111/ijfs.16544

38. Pektaş AN, Korkmaz EM. Novel antimicrobial defensin peptides from different coleopteran insects (Coleoptera: Insecta): Identification, characterisation and antimicrobial properties. Journal of Asian Natural Products Research. 2025;27(8):1146–1160. https://doi.org/10.1080/10286020.2024.2448011

39. Ghafoor H, Asim MN, Ibrahim MA, Ahmed S, Dengel A. CAPTURE: Comprehensive anti-cancer peptide predictor with a unique amino acid sequence encoder. Computers in Biology and Medicine. 2024;176:108538. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.108538

40. Hajigha MN, Hajikhani B, Vaezjalali M, Kafil HS, Anari RK, *et al*. Antiviral and antibacterial peptides: Mechanisms of action. Heliyon. 2024;10(22):e40121. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40121

41. Смирнова А. В., Тихонов С. А. Идентификация и предиктивный анализ аминокислотных паттернов, обуславливающих потенциальную антигиперурикемическую активность пептидов. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 4. С. 687–700. [Smirnova AV, Tikhonov SL. Amino acid patterns that determine antihyperuricemic activity of peptides: Identification and predictive analysis. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(4):687–700. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2536

42. Mottola S, Del Bene A, Mazzarella V, Cutolo R, Boccino I, *et al*. Sustainable ultrasound-assisted solid-phase peptide synthesis (SUS-SPPS): Less waste, more efficiency. Ultrasonics Sonochemistry. 2025;114:107257. https://doi.org/10.1016/j.Ultsonch.2025.107257

43. Kohl J, Jerger S, König D, Centner C. Chapter 21 – Applications in nutrition: Sport nutrition. In: Toldrá F, Wu J, editors. Biologically Active Peptides. NY, Oxford: Academic Press; 2021. pp. 525–550. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821389-6.00024-8

44. Chandimali N, Bak S-G, Park EH, Lim H-J, Won Y-S, *et al*. Bioactive peptides derived from duck products and by-products as functional food ingredients. Journal of Functional Foods. 2024;113:105953. https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105953

45. Asim MN, Asif T, Mehmood F, Dengel A. Peptide classification landscape: An in-depth systematic literature review on peptide types, databases, datasets, predictors architectures and performance. Computers in Biology and Medicine. 2025;188:109821. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2025.109821

46. Bao X, Wu J. Impact of food-derived bioactive peptides on gut function and health. Food Research International. 2021;147:110485. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110485

47. Chen D, Shu Y, Chen J, Cao X. Preparation and in vitro bioactive evaluation of cashew-nut proteins hydrolysate as a potential source of anti-allergy peptides. Journal of Food Science & Technology. 2021;58:3780–3789. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04838-z

48. Suttie JM, Gluckman PD, Butler JH, Fennessy PF, Corson ID, *et al*. Insum-like growth factor 1 (IGF-1) antler-stimulating holmone? Endocrinology. 1985;116(2):846–848. https://doi.org/10.1210/endo-116-2-846

49. Zhao L, Wang X, Zhang X, Xie Q. Purification and identification of anti-inflammatory peptides derived from simulated gastrointestinal digests of velvet antler protein (*Cervus elaphus* Linnaeus). Journal of Food and Drug Analisis. 2016;24(2):376–384. https://doi.org/10.1016/j.jfda.2015.10.003

50. Ma S, Ding Q, Xia G, Li A, Li J, *et al*. Multifunctional biomaterial hydrogel loaded with antler blood peptide effectively promotes wound repair. Biomedicine & Pharmacotherapy. 2024;170:116076. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.116076

51. Hao M, Peng X, Sun S, Ding C, Liu W, *et al*. Chitosan/sodium alginate/velvet antler blood peptides hydrogel promoted wound healing by regulating PI3K/AKT/mTOR and SIRT1/NF-kB pathways. Frontiers in Pharmacology. 2022;13:913408. https://doi.org/10.3389/fphar.2022.913408

52. Gómez JA, Ceacero F, Landete-Castillejos T, Gaspar-López E, García AJ, *et al*. Factors affecting antler investment in Iberian red deer. Animal Production Science. 2012;52:867–873. https://doi.org/10.1071/AN11316

53. Shi H, Yu T, Li Z, Lu W, Zhang M, *et al*. Bone regeneration strategy inspired by the study of calcification behavior in deer antler. Materials Science and Engineering: C. 2015;57:67–76. https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.07.043

54. Hamid HA, Khairul Anuar MZA, Zulkifli FH. Preparation and characterization of deer velvet antler/polyvinyl alcohol (DVA/PVA) scaffold for bone tissue engineering. Materialstoday: Proceedings. 2022;51(Part 2):1332–1337. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.377

55. Sawant RC, Somkuwar SR, Luo S-Y, Kamble RB, Panhekar DY, *et al*. Chapter 4 – Novel extraction and characterization methods for phytochemicals. In: Pati S, Sarkar T, Lahiri D, editors. Recent Frontiers of Phytochemicals. Netherlands: Elsevier; 2023. pp. 63–84. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19143-5.00035-9

56. Chonco L, Landete-Castillejos T, Serrano-Heras G, Pérez Serrano M, Pérez-Barbería FJ, *et al*. Anti-tumour activity of deer growing antlers and its potential applications in the treatment of malignant gliomas. Scientific Reports. 2021;11:42. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79779-w

57. Loftus LV, Rolle LTA, Wang B, Pienta KJ, Amend SR. Dysregulation of labile iron predisposes chemotherapy resistant cancer cells to ferroptosis. International Journal of Molecular Sciences. 2025;26(9):4193. https://doi.org/10.3390/ijms26094193

58. Kim C-T, Gujral N, Ganguly A, Suh J-W, Sunwoo HH. Chondroitin sulphate extracted fromantler cartilage using high hydrostatic pressure and enzymatic hydrolysis. Biotechnology reports. 2014;4:14–20. https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.07.004

59. Collazo N, Carpena M, Nuñez-Estevez B, Otero P, Simal-Gandara J, *et al*. Health promoting properties of bee royal jelly: Food of the queens. Nutrients. 2021;13(2):543. https://doi.org/10.3390/nu13020543

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Кротова Мария Георгиевна / Maria G. Krotova ORCID 0000-0001-7878-8529; eLIBRARY SPIN 9417-6530
Гришаева Ирина Николаевна / Irina N. Grishaeva ORCID 0000-0002-5172-4143; eLIBRARY SPIN 6113-5403
Неприятель Алексей Анатольевич / Aleksey A. Nepriyatel ORCID 0000-0001-8676-4324; eLIBRARY SPIN 6486-3635

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2612
https://elibrary.ru/IOKLAY

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Экстракция фенольных соединений из продуктов механического фракционирования подсолнечного шрота

И. В. Крылова

ВНИИЖиров, Санкт-Петербург, Россия

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию: 27.01.2025
Принята после рецензирования: 13.03.2025
Принята к публикации: 05.08.2025

e-mail: irinakrylova1987@gmail.com
© И. В. Крылова, 2025

Аннотация.
Подсолнечник – масличная культура мирового значения, широко перерабатываемая и являющаяся ценным источником белка (содержание сырого протеина до 40 %). Для повышения содержания сырого протеина в растительном сырье применяют механическое фракционирование, но для продуктов переработки подсолнечника оно изучено недостаточно. Фенольные соединения, составляющие до 4 % подсолнечного шрота, придают ему выраженные антиоксидантные свойства, но способны вызывать нежелательное окрашивание. Целью данной работы являлось получение белковых препаратов подсолнечника со сниженным содержанием фенольных соединений.
Объектами исследования послужили фракции подсолнечного шрота, полученные при механическом фракционировании и отличающиеся повышенным содержанием сырого протеина. Для снижения содержания фенольных соединений фракции обрабатывали растворами этилового спирта. В полученных белковых препаратах определяли антиоксидантные свойства методом поглощения радикалов DPPH.
Содержание фенольных соединений в продуктах фракционирования подсолнечного шрота варьировалось от 2,81 до 3,31 % и коррелировало с содержанием сырого протеина (от 41,98 до 43,87 %). Во фракциях с одинаковым размером частиц (до 0,25 мм) содержание сырого протеина и фенольных соединений было схожим, независимо от состава исходного образца (до измельчения) и способа его измельчения. Кроме того, полученные фракции отличались повышенными антиоксидантными свойствами (от 51,08 до 54,52 % DPPH). Максимальный выход фенольных соединений (73 %) достигнут при однократной экстракции 80 % этиловым спиртом при температуре 60 °С и гидромодуле 1:10. Эти результаты сопоставимы с выходом фенольных соединений 76 % при трехкратной экстракции.
Полученные белковые препараты, благодаря повышенному содержанию сырого протеина и пониженному содержанию фенольных соединений, могут использоваться в пищевой промышленности, в частности, для обогащения белком и антиоксидантами мучных изделий.

Ключевые слова. Подсолнечный шрот, механическое фракционирование, сырой протеин, фенольные соединения, антиоксидантные свойства, водно-спиртовая экстракция

Для цитирования: Крылова И. В. Экстракция фенольных соединений из продуктов механического фракционирования подсолнечного шрота. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 833–844. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2612

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2612
https://elibrary.ru/IOKLAY

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

Extracting Phenolic Compounds from Products of Mechanically Fractionated Sunflower Meal

Irina V. Krylova

All-Russian Research Institute of Fats VNIIZhirov, St. Petersburg, Russia
ITMO University, St. Petersburg, Russia

Received: 27.01.2025
Revised: 13.03.2025
Accepted: 05.08.2025

e-mail: irinakrylova1987@gmail.com
© I.V. Krylova, 2025

Abstract.
Sunflower is an oilseed crop of global significance. It is a valuable source of protein with a crude protein content of up to 40%. Mechanical fractionation increases the yield of crude protein content from plant raw materials, but it remains understudied for sunflower meal. Sunflower meal contains up to 4% phenolics, which renders it with strong antioxidant properties. However, phenolics may cause coloration. This article describes sunflower protein preparations with low phenolic content.
The study featured sunflower meal fractions obtained by mechanical fractionation with high crude protein content. To reduce the phenolic content, the fractions were treated with ethyl solutions. The antioxidant properties of the resulting protein preparations were determined using the DPPH radical scavenging method.
The phenolic content of sunflower meal fractionation products ranged from 2.81 to 3.31% and correlated with the crude protein content (41.98–43.87%). Fractions with the same particle size (≤ 0.25 mm) had similar crude protein and phenolic contents, regardless of the original sample composition and the grinding method. The obtained fractions demonstrated enhanced antioxidant properties (51.08–54.52% DPPH). The highest phenolic yield (73%) belonged to the procedure that involved a single extraction with 80% ethanol at 60°C and a hydromodulus of 1:10. This result was comparable to the yield (76%) obtained by three extractions.
The resulting protein preparations were rich in crude protein but low in phenolics. The method could be used to fortify flour products with proteins and antioxidants.

Keywords. Sunflower meal, mechanical fractionation, crude protein, phenolic compounds, antioxidant properties, water-ethanol extraction

For citation: Krylova IV. Extracting Phenolic Compounds from Products of Mechanically Fractionated Sunflower Meal. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):833–844. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2612

Введение

Антиоксиданты – биологически активные вещества, поддерживающие окислительно-восстановительное равновесие в организме человека. Механизм их действия заключается в нейтрализации свободных радикалов, активных форм азота и кислорода. Эти соединения образуются не только в ходе обмена веществ, но и под влиянием внешних факторов, таких как загрязнение окружающей среды. Окислительный стресс, обусловленный этими соединениями, вызывает повреждение клеток и способствует развитию диабета, сердечно-сосудистых и других хронических заболеваний. Чтобы нейтрализовать активные вещества и предотвратить окислительное повреждение клеток, необходимо поступление антиоксидантов в организм [1].

Природные антиоксиданты подразделяются на ферментативные и неферментативные (витамины, полифенолы и флавоноиды) [1]. В работе А. В. Табакаева и О. В. Табакаевой показано, что предпочтительнее использование натуральных антиоксидантов, а не синтетических, благодаря их безопасности и эффективности [2]. В рационе человека основными антиоксидантами являются полифенолы, включающие несколько классов соединений, в том числе флавоноиды и фенольные кислоты [3]. Фенольные соединения по механизму действия относятся к антирадикальным ингибиторам, то есть способны при химическом взаимодействии ингибировать окисление, вызванное свободными радикалами [4]. Полифенолы преимущественно содержатся в растительном сырье, однако в нем они присутствуют в связанном виде, что может снижать их биологическую доступность. Преобразование растительного сырья путем расщепления его компонентов способствует повышению доступности фенольных соединений. В работе A. Silva *et al.* выявлено, что после гидролиза растительного сырья, например при изготовлении напитков, повышается растворимость и усвояемость фенольных соединений [5].

Способы извлечения фенольных соединений из растительного сырья зависят от их локализации, а также

от состава и свойств сырья. Обычно фенольные соединения экстрагируют различными органическими растворителями, в том числе метанолом [6, 7], этанолом [8, 9], изопропанолом [10] и ацетоном [6]. При этом ацетон, как более полярный растворитель, способен извлекать большее количество фенольных соединений, чем этанол и метанол. Однако 80 % водный раствор этанола был выбран как наиболее безопасный для применения в пищевой промышленности [6]. Кроме того, экстракция водными растворами этанола с концентрацией до 60 % при температуре до 50 °С способствует сохранению нативных свойств белка [8]. Исследования также проводились с меньшими концентрациями, например 30 % [11], при этом гидромодуль составлял 1:86, а экстракция длилась 4 ч. В результате, выход фенольных соединений при экстракции водными растворами этанола определялся в основном его концентрацией и температурой процесса [12].

Ранее выполнялись работы по извлечению фенольных соединений из зеленого чая [13], жмыха подсолнечника [8] и выжимок винограда [9]. При экстракции зеленого чая водными растворами этанола [13] на выход фенольных соединений повлияло соотношение растворителя к массе сырья. При извлечении жмыха подсолнечника [8] также использовали водный раствор этанола, причем экстракцию проводили в три стадии. Виноградные выжимки экстрагировали также водным раствором этанола, но с применением ультразвукового и микроволнового воздействия [9]. Таким образом, экстракция фенольных соединений этанолом эффективна для различных видов растительного сырья.

В последние годы во многих странах Европы разрабатываются технологии утилизации масличных шротов, в том числе шрота подсолнечника – одной из главных масличных культур стран Европы. Масличные семена и продукты их переработки отличаются высокой энергетической ценностью, высоким содержанием белка и клетчатки [14]. Количество белка и клетчатки в шроте зависит от степени удаления лузги семян, которая определяется методом экстракции масла. При отжиме получают жмых, а при экстракции растворителями – шрот с низким содержанием масла [14]. Широкая доступность и низкая стоимость масличных шротов делают их перспективным сырьем для валоризации и получения белка. Полезными компонентами шрота, помимо протеина, являются остаточные количества липидов (преимущественно триглицериды), составляющие клетчатку (целлюлоза, лигнин) и другие вещества [15].

Семена подсолнечника отличаются высоким содержанием фенольных соединений, которых насчитывается более десяти. Основная их часть концентрируется в ядре семян, поэтому при переработке подсолнечника на масло фенольные соединения остаются в шроте. Подсолнечный шрот содержит до 4 % фенольных соединений в сухом веществе, причем до 70 % этого количества приходится на хлорогеновую кислоту и ее производные. В сухом обезжиренном веществе семян содержание хлорогеновой кислоты варьируется от 0,5 до 4,5 % в зависимости от сорта подсолнечника, условий его выращивания и хранения [16]. Семена подсолнечника также содержат феруловую и дикафеилхинную кислоты. В подсолнечном шроте, помимо хлорогеновой кислоты, присутствует кофейная кислота, составляющая до 19 % от общего количества фенольных соединений [17]. Тем не менее, именно хлорогеновая кислота является основным фенольным соединением подсолнечного шрота.

Хлорогеновая, или 5-О-кофеилхинная кислота, относящаяся к гидроксикоричным кислотам, выделена из экстрактов чая и кофе. Известны такие свойства кислоты, как антиоксидантные, кардиопротекторные, гепатопротекторные и противовоспалительные [18]. Кроме того, антимикробная активность хлорогеновой кислоты против широкого спектра микроорганизмов позволяет использовать ее для продления срока хранения пищевых продуктов [18]. Таким образом, изучение содержания хлорогеновой кислоты в растительном сырье и способов ее выделения является перспективным для ее применения в пищевой промышленности.

Целью данного исследования являлось получение белковых препаратов подсолнечника со сниженным содержанием фенольных соединений.

Объекты и методы исследования

Исследуемые образцы. В данной работе для получения белковых фракций выбраны два образца подсолнечного шрота российского производства. Первый образец содержал на 4,6 % больше сырого протеина и на 10 % меньше клетчатки, чем второй, отличаясь также более высоким уровнем фенольных соединений (табл. 1).

Сухое фракционирование подсолнечных шротов включало измельчение образцов тремя способами:

Таблица 1. Состав образцов подсолнечного шрота

Table 1. Composition of sunflower meal samples

Показатель	Образец 1	Образец 2
Массовая доля влаги, %	9,91	9,59
Содержание сырого протеина, % абсолютно сухого вещества	39,44	34,75
Массовая доля жира, % абсолютно сухого вещества*	1,89	1,81
Остаточное количество растворителя, %*	0,02	0,02
Посторонние и металлические примеси*	–	–
Содержание фенольных соединений, % абсолютно сухого вещества	2,81	2,20

Примечание: * – по данным производителя.

Note: * – based on official data.

на роторно-ножевой мельнице марки ЭМ-3А, на кулачковой мельнице и на измельчителе ударно-активаторного действия марки Desi-15 – с последующей классификацией полученного материала. Измельчение проводили таким образом, чтобы размер частиц не превышал 2,00 мм. Классификацию осуществляли на ситах с размерами ячеек 0,25 мм и 1,00 мм, что позволило получить три фракции: с размерами частиц до 0,25 мм, от 0,25 до 1,00 мм и от 1,00 до 2,00 мм.

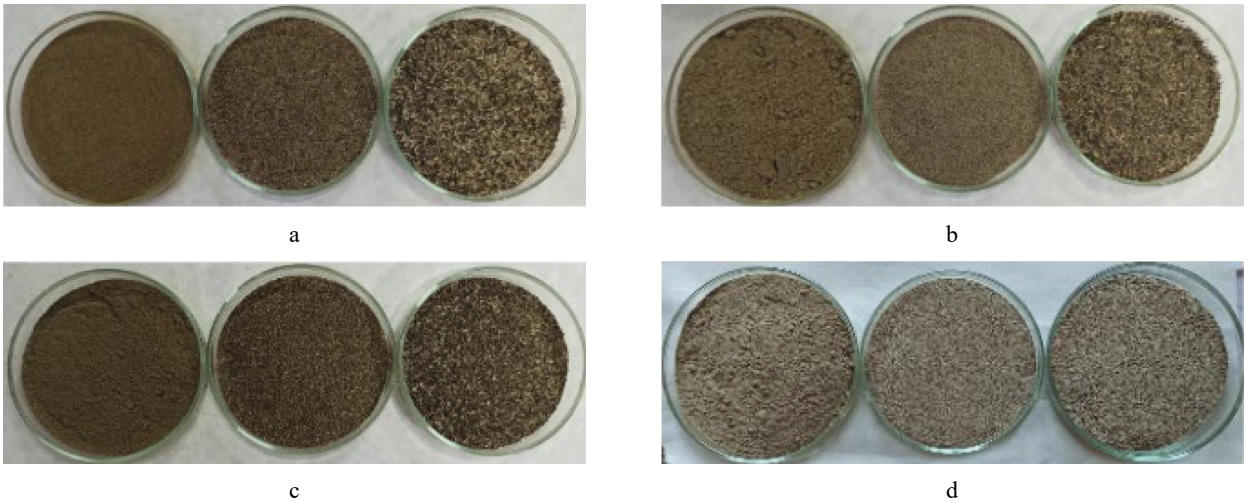
Определение физико-химического состава. Гранулометрический состав фракций определяли методом статического рассеяния света в лазерном анализаторе размеров частиц (Bettersizer 2600, Bettersize) при воздушной диспергации образцов. Массовую долю влаги определяли методом высушивания до постоянного веса при 105 ± 2 °C. Содержание сырой клетчатки анализировали методом Геннеберга-Штомана с применением промежуточной фильтрации. Содержание сырого протеина определяли по методу Кьельдаля (анализатор KjelFlex-360, Buchi); содержание фенольных соединений – с помощью реактива Фолина-Чокалтеу с последующим измерением на фотоколориметре КФК-2 [6, 7]. Антиоксидантную активность спиртовых экстрактов белковых фракций измеряли методом DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил, $C_{18}H_{12}N_5O_6$, M = 394,33) с последующим определением коэффициента пропускания при 517 нм на спектрофотометре Shimadzu UV-1800 [7].

Результаты и их обсуждение

Сухое (механическое) фракционирование – безреагентный способ разделения сухих сыпучих продуктов различного происхождения, не требующий применения воды или растворителей. Это позволяет избежать не только расхода воды, но и затратного процесса сушки готового продукта, а также использования агрессивных химических веществ и высоких температур. В контексте современных экологически ориентированных производств, возможность обойтись без воды и растворителей является значительным преимуществом этого способа [19, 20]. Наиболее частыми объектами сухого фракционирования являются семена бобовых и отруби. Среди масличных культур данный метод применялся для обезжиренной муки сои, решая задачи снижения уровня крахмала [19], обогащения пищевыми волокнами [20, 21], снижения содержания клетчатки [22]. В качестве методов фракционирования преимущественно использовалась пневмоклассификация, а в ряде случаев [22, 23] – электростатические методы. Анализ литературных данных показал, что фракционирование подсолнечника и продуктов его переработки остается малоизученным.

Состав и свойства продуктов фракционирования зависят как от состава самого сырья, так и от параметров процесса фракционирования. Оба этих фактора были изучены на первой стадии исследования. Для этого выбраны два образца подсолнечного шрота различного состава, измельченные разными способами. Для изучения брали белковые фракции этих шротов, полученных после рассева на ситах, с размером частиц не более 0,25 мм. На рисунке 1 показан внешний вид белковых фракций подсолнечного шрота, полученных при различных параметрах фракционирования.

Мелкая фракция представляла собой однородный порошок, напоминающий муку, средняя – однородную крупку, а крупная фракция состояла преимущественно из частиц лузги. Эти частицы также присутствовали в средней фракции, но в значительно меньшем коли-



a – образец 1, измельченный на роторно-ножевой мельнице; b – образец 1, измельченный на кулачковой мельнице; c – образец 2, измельченный на роторно-ножевой мельнице; d – образец 2, измельченный на измельчителе ударно-активаторного действия

Рисунок 1. Фракции подсолнечного шрота

Figure 1. Fractions of sunflower meal

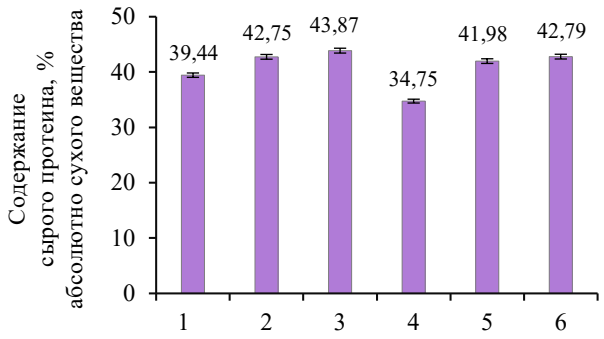
Таблица 2. Гранулометрический состав фракций

Table 2. Granulometric composition of fractions

Образец	Размер частиц, мм				
	d10	d50	d90	d(4,3)	(d90–d10)/d50
Образец 1, измельченный на кулачковой мельнице	41,50 ± 0,01	142,40 ± 0,01	278,50 ± 0,01	154,30 ± 0,01	1,66 ± 0,01
Образец 1, измельченный на роторно-ножевой мельнице	52,12 ± 0,01	153,60 ± 0,01	277,90 ± 0,01	161,00 ± 0,01	1,47 ± 0,01
Образец 2, измельченный на измельчителе ударно-активаторного действия	30,01 ± 0,01	106,50 ± 0,01	228,00 ± 0,01	120,20 ± 0,01	1,86 ± 0,01
Образец 2, измельченный на роторно-ножевой мельнице	14,07 ± 0,01	65,98 ± 0,01	182,00 ± 0,01	85,03 ± 0,01	2,55 ± 0,01

честве, тогда как видимые частицы лузги в мелкой фракции отсутствовали. Это свидетельствовало о том, что ядро семян при измельчении раздробилось до состояния порошка и сконцентрировалось в мелкой фракции, тогда как более твердая лузга поддавалась измельчению в меньшей степени. Как видно из рисунка 2, белковые фракции, полученные из образца 1, были светлее, чем из образца 2. Кроме того, фракции образца 1 проявляли большую склонность к комкованию, особенно та, что получена после размола на роторно-ножевой мельнице. Напротив, фракции образца 2 не склонны к образованию комков при обоих способах измельчения.

Образование комков в мелкой фракции объясняется агломерацией мелких частиц шрота. Эта склонность мелких частиц к слипанию, отмеченная и при фракционировании овса [24], обусловлена электростатическим взаимодействием и силами Ван-дер-Ваальса. Агломерация может происходить как между мелкими частицами, так и между мелкими и крупными частицами, что приводит к тому, что размер частиц во фракции оказывается больше, чем при измерении физическими методами. Размер частиц также существенно влияет на экстракцию биологически активных соединений: снижение размера увеличивает площадь поверхности и дисперсность материала, делая его более доступным для экстрагента [25]. Интенсивное измельчение, в свою очередь, способствует разрушению клеточных стенок, улучшая высвобождение экстрагируемых компонентов. Однако, слишком мелкие частицы могут затруднять последующее отделение проэкстрагированного материала от экстракта (например, фильтрованием или осаждением) [25]. В связи с этим, для тонких фракций подсолнечного шрота, полученных в данном исследовании, дополнительно изучен их гранулометрический состав (табл. 2). Значения процентилей d10, d50 и d90 отражают долю частиц, размер которых меньше заданного (например, d90 = 228,00 мм означает, что 90 % частиц имеют размер менее 228 мм). Средневзвешенный диаметр частиц d(4,3) характеризует количественно преобладающий размер частиц во фракции. Кроме того, рассчитан относительный диапазон (d90-d10)/d50, который демонстрировал разброс частиц по размерам.



1 – образец 1 исходный (до измельчения); 2 – образец 1, измельченный на роторно-ножевой мельнице; 3 – образец 1, измельченный на кулачковой мельнице; 4 – образец 2 исходный (до измельчения); 5 – образец 2, измельченный на роторно-ножевой мельнице; 6 – образец 2, измельченный на измельчителе ударно-активаторного действия

Рисунок 2. Содержание сырого протеина во фракциях

Figure 2. Crude protein in fractions

Из приведенных данных (табл. 2) можно отметить, что распределение по размерам частиц заметно отличалось для фракции образца 2, измельченного на роторно-ножевой мельнице. В этой фракции 90 % частиц меньше 182 мм, тогда как для других фракций значение d90 составляло 228–279 мм. Другие показатели процентили (d10, d50) и средневзвешенный размер частиц в этой фракции также оказались меньше. При этом разброс размеров частиц в ней оказался заметно выше (коэффициент вариации – 2,55). Так как задачей механического фракционирования является получение фракций с повышенным содержанием сырого протеина, было изучено его содержание в полученных фракциях (рис. 2).

Как видно из представленных на графике данных, содержание сырого протеина в исходных образцах (до измельчения) мало повлияло на его содержание в продуктах фракционирования. Во всех исследуемых фракциях уровень белка находился в пределах

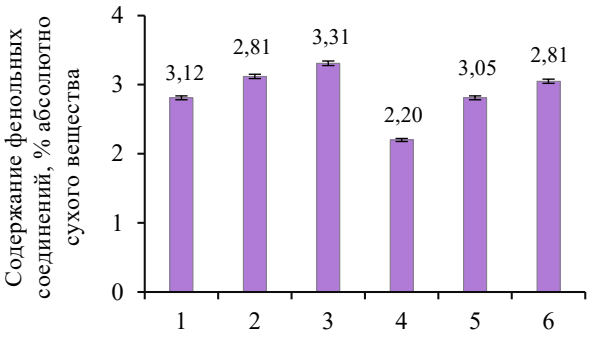
42–44 %, несмотря на разность в 5 % между исходными образцами. При этом максимальное содержание сырого протеина (43,87 %) получено во фракции образца 2, изначально с более низким белком. Таким образом, содержание белка после фракционирования было повышено на 9 %, по сравнению с исходным образцом. Это повышение зависит как от способа фракционирования, так и от состава сырья. Так, при воздушной классификации подсолнечного шрота [26] содержание белка было на 6 % выше, чем в исходном сырье, для люпина и гороха [19, 27] – соответственно на 20 и на 3 % выше. Следовательно, результаты механического фракционирования подсолнечного шрота в данном исследовании сравнимы с результатами пневмоклассификации [26] аналогичного сырья.

В соответствии с поставленной целью работы, в полученных фракциях определяли суммарное содержание фенольных соединений (рис. 3).

Приведенные данные (рис. 3) показывали тенденцию к повышению уровня фенольных соединений в белковых фракциях. Он оказался близок во всех полученных фракциях, несмотря на их различное содержание в исходных образцах (до измельчения). При этом во фракциях образца 2, содержавшего меньше фенольных соединений, их уровень оказался ниже, чем во фракциях образца 1. В частности, максимальный уровень фенольных соединений (3,31 %) выявлен во фракции, полученной из образца 1 и был на 0,5 % выше, чем в образце 1 до измельчения (2,81 %). Такое повышенное содержание фенольных соединений в белковых фракциях согласовывалось с литературными данными об их распределении в семенах подсолнечника. В исследованиях [28, 29], посвященных проблеме переработки подсолнечника, неоднократно указывалось, что значительная часть фенольных соединений находится в белковой части семян. При этом фенольные соединения образуют с белками комплексы посредством ковалентных и водородных связей, а также гидрофобных взаимодействий [28]. В частности, хлорогеновая кислота может быть ассоциирована как с 2S альбуминами, так и с 11S глобулинами, то есть запасными белками подсолнечника [29] и сосредоточена в ядре семени. При фракционировании частицы ядра семени отделяются от частиц лузги и концентрируются в мелких фракциях, поэтому фенольные соединения оказываются также сосредоточены в мелких фракциях. Приведенный график уровня фенольных соединений во фракциях (рис. 3) можно сопоставить с графиком уровня сырого протеина (рис. 2), в котором отражалась та же тенденция. Это свидетельствовало о том, что при механическом фракционировании одновременно с увеличением уровня сырого протеина во фракциях повышался и уровень фенольных соединений.

Увеличение количества фенольных соединений, несомненно, должно влиять и на антиоксидантные свойства фракций. Поэтому в полученных фракциях определяли антиоксидантную активность, выраженную в степени поглощения DPPH (табл. 3). Данный метод основан на определении количества свободных радикалов реактива DPPH [2, 4]. Широкое применение метода в исследовании пищевых продуктов и сырья объясняется его быстротой и доступностью. Также показано, что определение антиоксидантной активности методом DPPH дает результаты, сопоставимые с другими методами [4, 30].

Среди полученных фракций (табл. 3) максимальной антиоксидантной активностью (54,52 %) отличалась фракция образца 1 после измельчения на кулачковой мельнице, а наименьшей (51,08 %) – фракция образца 2, полученная после измельчения на роторно-ножевой мельнице. Во всех изученных фракциях наблюдалась корреляция между содержанием фенольных соединений и антиоксидантной активностью: чем выше было содержание фенольных соединений, тем выше была активность. Максимальное содержание фенольных соединений отмечено во фракции образца 1, а минимальное – во фракции образца 2 (рис. 3). Эти результаты согласовывались с литературными данными [31],



1 – образец 1 исходный (до измельчения); 2 – образец 1, измельченный на роторно-ножевой мельнице; 3 – образец 1, измельченный на кулачковой мельнице; 4 – образец 2 исходный (до измельчения); 5 – образец 2, измельченный на роторно-ножевой мельнице; 6 – образец 2, измельченный на измельчителе ударно-активаторного действия

Рисунок 3. Содержание фенольных соединений во фракциях

Figure 3. Phenolics in fractions

Таблица 3. Антиоксидантная активность фракций

Table 3. Antioxidant profile of fractions

Образец	Антиоксидантная активность, % DPPH
Образец 1, измельченный на роторно-ножевой мельнице	53,37 ± 0,01
Образец 1, измельченный на кулачковой мельнице	54,52 ± 0,01
Образец 2, измельченный на роторно-ножевой мельнице	51,08 ± 0,01
Образец 2, измельченный на измельчителе ударно-активаторного действия	53,52 ± 0,01

что антиоксидантная активность семян подсолнечника и продуктов его переработки обусловлена присутствием в них фенольных соединений. Полученные данные также можно сравнить с антиокислительной активностью микроводорослей [4], составившей 58,16 %. Таким образом, повышение содержания фенольных соединений в результате механического фракционирования одновременно способствовало увеличению антиоксидантной активности фракций. Благодаря этому продукты механического фракционирования подсолнечного шрота могут быть использованы в рецептурах функциональных мучных изделий.

Несмотря на это, избыток фенольных соединений в полученных ингредиентах нежелателен для включения данных продуктов в мучные изделия из-за возможного изменения окраски. Поэтому на следующем этапе исследования изучена экстракция фенольных соединений из продуктов фракционирования подсолнечного шрота. Для проведения экстракции выбран образец 1, измельченный на роторно-ножевой мельнице. Именно при фракционировании этого образца получена мелкая фракция с максимальным содержанием сырого протеина (39,44 %) и фенольных соединений (3,31 %).

При рассеве данного образца получены фракции с размерами частиц 0,01–0,25 мм, 0,25–1,00 мм и 1,00–2,00 мм (рис. 1). Благодаря перераспределению частиц ядра семян и частиц лузги, фракции различались по составу. Максимальным содержанием сырого протеина, превышавшим исходный образец (43,87 %), отличалась фракция с размером частиц 0,01–0,25 мм. В остальных фракциях содержание сырого протеина было ниже, чем в исходном образце (рис. 4).

На рисунке 4 отражено распределение белка, характерное для сухого фракционирования растительного сырья. Например, при фракционировании ячменя [18] мелкие фракции содержали больше протеина, жира и золы, чем крупные, в которых было больше β-глюканов и клетчатки. Схожие результаты получены при фракционировании рапса [32], где выявлена зависимость между размером частиц и содержанием сырого протеина во фракциях. Таким образом, полученные результаты сопоставимы с данными других исследований, несмотря на различия в способах фракционирования (пневмоклассификация [18], трибоэлектрическое разделение [32] и рассев на ситах в данной работе).

Представленное выше распределение белка во фракциях необходимо сопоставить с распределением фенольных соединений (рис. 5).

Из данных, представленных на рисунке 5, видно, что фенольные соединения во фракциях распределялись аналогично сырому протеину. Максимальный уровень

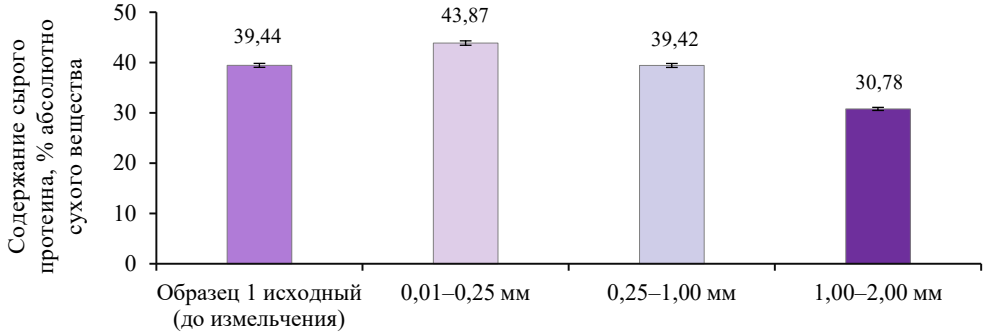


Рисунок 4. Содержание сырого протеина в рассеве образца 1

Figure 4. Crude protein in Sample 1 (sieved)

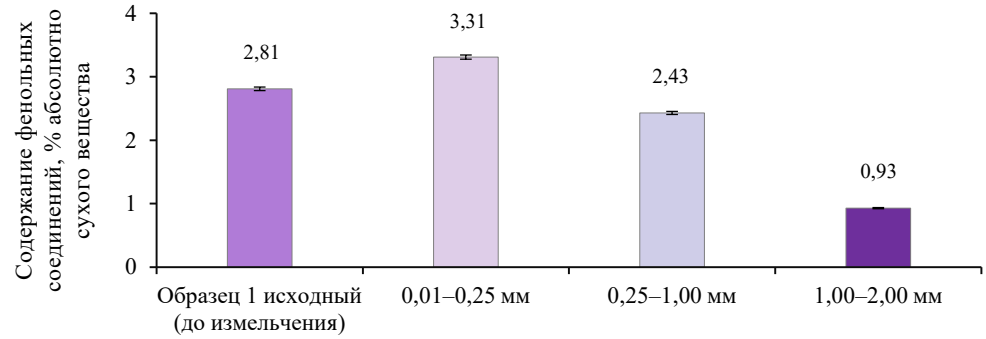


Рисунок 5. Содержание фенольных соединений в рассеве образца 1

Figure 5. Phenolics in Sample 1 (sieved)

Таблица 4. Антиоксидантная активность фракций образца 1

Table 4. Antioxidant activity of fractions in Sample 1

Образец / фракции	Антиоксидантная активность, % DPPH
Образец 1 исходный (до измельчения)	11,12 ± 0,01
0,01–0,25 мм	54,52 ± 0,01
0,25–1,00 мм	5,16 ± 0,01
1,00–2,00 мм	1,14 ± 0,01

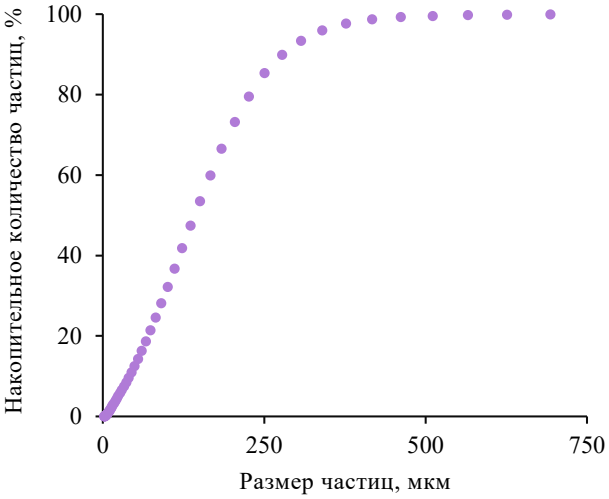


Рисунок 6. Гранулометрический состав фракции образца 1, измельченного на кулачковой мельнице

Figure 6. Granulometric composition of fraction in Sample 1 (ground in a bruising mill)

фенольных соединений достигнут во фракции с размером частиц 0,01–0,25 мм, а с увеличением размера частиц их содержание уменьшалось. Эта закономерность может быть связана с преобладанием фенольных соединений подсолнечника в белковой части семян [29]. Для фракций, полученных при рассеве, также определены антиоксидантные свойства по методу с применением реактива DPPH (табл. 4).

Приведенные в таблице 4 данные показывают, что антиоксидантная активность заметно (в 5 раз) возросла во фракции с размером частиц 0,01–0,25 мм, по сравнению с исходным шротом. При этом антиоксидантная активность двух других фракций была ниже, чем у исходного шрота. Сопоставление этих значений с данными рисунка 5 демонстрирует, что изменение антиоксидантной активности во фракциях проявляло аналогичную тенденцию, что и распределение фенольных соединений, но более выражено. Биологическая активность фенольных соединений растительного сырья во многом определяется их взаимодействием с другими компонентами. В растительном сырье фенольные соединения могут образовывать растворимые и нерастворимые комплексы с белками, изменяя при этом пространственную структуру белковой молекулы. Эти взаимодействия влияют на биологическую активность и биодоступность как белков, так и самих фенольных соединений, причем могут приводить к повышению активности [28].

Несмотря на благоприятные свойства фенольных соединений, их избыток в пищевых ингредиентах нежелателен из-за возможного возникновения темной окраски в щелочной среде или при нагревании [17]. Поэтому на следующем этапе исследования изучена экстракция фенольных соединений из полученной высокобелковой фракции подсолнечного шрота. Для экстракции выбран образец 1, измельченный на кулачковой мельнице, фракция которого с размерами частиц менее 0,25 мм содержала 39,44 % сырого протеина, 3,31 % фенольных соединений и отличалась высокой антиоксидантной активностью (54,52 %).

Процесс экстракции растительного сырья во многом зависит от его физических параметров, в том числе степени измельчения. Для исследуемой фракции подсолнечного шрота изучен гранулометрический состав (рис. 6).

Как показано на графике распределения частиц по размерам (рис. 6), 90 % из них были меньше 275 мм. Исследователи утверждали, что меньший размер частиц приводит к большему выходу экстракции за счет проникновения экстрагента в частицы [25]. Кроме того, измельчение сырья связано с разрушением клеточных стенок и высвобождением их содержимого. Поэтому выбор именно фракции с мелкими частицами может способствовать лучшему извлечению фенольных соединений.

Кроме особенностей сырья, на выход экстракции влияют и параметры самого процесса: выбор растворителя, его концентрация, температура, количество стадий экстракции, ее продолжительность, скорость перемешивания, соотношение твердой и жидкой фаз. При экстракции фенольных соединений из чайного листа [13] оптимальным соотношением количества сырья к количеству спиртового раствора оказалось 1:60. При экстракции фенольных соединений из подсолнечного жмыха [8] применяли соотношение образца к водно-спиртовому раствору 1:10. В данном исследовании выбраны соотношения растворителя к навеске в пределах 1:20, поскольку большее соотношение непрактично из-за высокого расхода растворителя (рис. 7). Экстракцию проводили 70 % водным раствором этанола при температуре 50 °С и скорости перемешивания 1000 об/мин в течение 30 мин. Экстракты отделяли от осадка центрифугированием при 2500 об/мин в течение 15 мин и определяли в них содержание фенольных соединений методом Фолина-Чокалтеу.

При увеличении соотношения растворителя к навеске содержание фенольных соединений в экстрактах заметно возрастало, затем рост становился менее резким. Характер этой зависимости был близок к квадратичной: $Y = 1{,}33 + 0{,}276X - 0{,}0321X^2$ ($R^2 = 0{,}971$). Таким образом, оптимальными признаны гидромодули

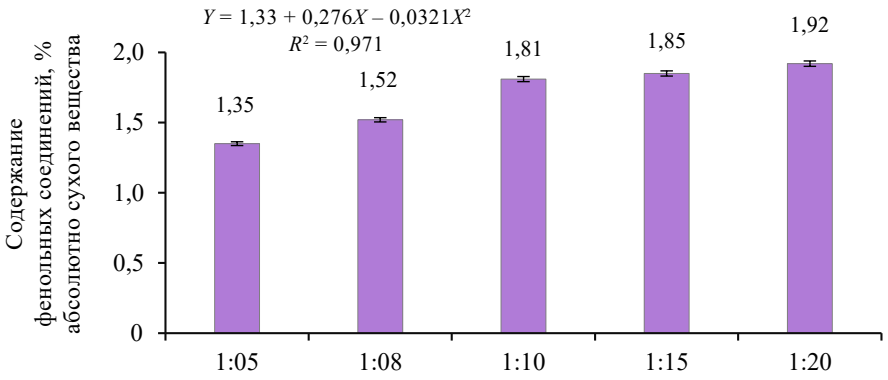


Рисунок 7. Содержание фенольных соединений экстрактах

Figure 7. Phenolics in extracts

Таблица 5. Выход фенольных соединений при различных гидромодулях

Table 5. Phenolic yields at different hydromodules

Гидромодуль	Выход фенольных соединений, %
1:5	41 ± 2
1:8	46 ± 2
1:10	55 ± 2
1:15	56 ± 2
1:20	58 ± 2

Таблица 6. Уровни и интервалы варьирования факторов

Table 6. Levels and units of variation across factors

Уровень и интервал	Температура, °С	Концентрация, %	X_1	X_2
Верхний уровень	60	80	+1	+1
Основной уровень	50	70	0	0
Нижний уровень	40	60	–1	–1
Интервал	10	10	–	–

Таблица 7. Выход фенольных соединений при различных условиях экстракции

Table 7. Phenolic yields under different extraction conditions

X_1	X_2	Фенольные соединения, %	Выход фенольных соединений, %
–1	–1	2,10 ± 0,01	63 ± 2
–1	+1	2,17 ± 0,01	66 ± 2
+1	–1	2,17 ± 0,01	66 ± 2
+1	+1	2,40 ± 0,01	73 ± 2

1:10, 1:15 и 1:20, так как дальнейшее его увеличение не оправдано. Дополнительно рассчитан массовый выход фенольных соединений, исходя из их содержания в навеске – 3,05 % (табл. 5).

Как видно из таблицы 5, максимальный выход фенольных соединений составил 58 % от их содержания в навеске и достигнут при гидромодуле 1:20. В исследовании [8] получен выход фенольных соединений 76 %. При этом экстракция проводилась также при гидромодуле 1:10, но с использованием 40 % этанола, при температуре 90 °С и в три стадии. Предположительно, именно трехкратная экстракция способствовала более высокому выходу фенольных соединений, по сравнению с данной работой.

В предыдущих исследованиях экстракции фенольных соединений [12] установлено, что наиболее значимыми параметрами растворителей на основе этанола являлись их концентрация и температура. При этом концентрация (соотношение воды и этанола) определяет полярность растворителя, от которой зависит как выход фенольных соединений, так и потери белка [8]. Авторами сообщалось, что повышение температуры экстракции нарушало нативные свойства белка, а также способствовало его потерям [8]. Поэтому на следующей стадии исследования изучено влияние температуры и концентрации на извлечение фенольных соединений.

Эти факторы выбраны для планирования эксперимента (табл. 6). Основной уровень факторов соответствовал их значениям в предыдущем эксперименте, где определялось значение гидромодуля (1:15).

Выходным параметром было содержание фенольных соединений в полученных после центрифугирования экстрактах. Кроме того, вычисляли процентный выход фенольных соединений по отношению к их содержанию во фракции подсолнечного шрота (табл. 7).

В данном эксперименте (табл. 7) выход фенольных соединений удалось повысить до 73 %, что сопоставимо с результатами других исследователей [8]. Этот результат получен при концентрации этилового спирта 80 % и температуре 60 °С. При этом содержание фенольных соединений в экстракте составило 2,40 % (табл. 6, 7). Как показано в статье [8], концентрация этанола выше

60 % способствует снижению потерь белка, однако температура более 50 °С не является благоприятной для его сохранения. В то же время, выход фенольных соединений 73 % в данном случае достигнут при однократной, а не трехкратной экстракции, что должно способствовать количественному и качественному сохранению белка.

Выводы

Наличие высокого уровня фенольных соединений является одним из ограничений для пищевого применения шрота подсолнечника и продуктов его переработки. Это связано с их окислением при щелочной экстракции подсолнечного белка и образованием зеленоватой окраски. Фенольные соединения – вторичные метаболиты растений, являющиеся биологически активными веществами [28, 33]. В семенах подсолнечника присутствует более 10 фенольных соединений, преимущественно хлорогеновая кислота и ее изомеры. Основное количество фенольных соединений сосредоточено в ядре семян, поэтому при переработке подсолнечника на масло они остаются в шроте [15, 34].

В данном исследовании показано, что продукты механического фракционирования подсолнечного шрота отличаются не только повышенным содержанием сырого протеина, но и фенольных соединений, что обусловлено особенностями сырья. Также это приводило к высокой антиоксидантной активности полученных фракций, что благоприятно для их применения в рецептурах пищевых продуктов. Однако следует учитывать, что избыток фенольных соединений может быть нежелателен для органолептических показателей пищевых ингредиентов, в частности, их окраски. Поэтому предпринята оптимизация процесса экстракции фенольных соединений водно-спиртовыми смесями. При этом выход фенольных соединений при однократной экстракции оказался сопоставим с результатами других исследователей при трехкратной экстракции.

Из литературных данных известно, что спиртовая экстракция фенольных соединений может приводить к потерям белка и ухудшению его свойств. Следовательно данные параметры также должны быть изучены в следующих исследованиях. Кроме того, ранее установлено, что продукты механического фракционирования подсолнечного шрота отличаются повышенными функционально-технологическими свойствами. Поэтому необходимо выяснить, как спиртовая экстракция фенольных соединений влияет на эти свойства, что и станет предметом дальнейших исследований. Результатом должна стать разработка технологии получения высокобелковых ингредиентов на основе подсолнечного шрота, применимых для использования в пищевой промышленности, в частности, для включения в мучные изделия.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Автор выражает благодарность Е. И. Самоделкину (ЦНИИ КМ Прометей) за измельчение образца на дезинтеграторной установке, а также А. С. Григорьеву (ООО Лабконцепт) за помощь в определении гранулометрического состава.

Conflict of interest

The author state that there is no conflict of interest.

Acknowledgements

The author would like to express her gratitude to E.I. Samodelkin, Prometey Central Research Institute, for assisting with disintegration and to A.S. Grigoriev, LabConcept, for determining the particle size distribution.

Список литературы / References

1. Chibuye B, Singh IS, Ramasamy S, Maseka KK. Natural antioxidants: A comprehensive elucidation of their sources, mechanisms, and applications in health. Next Research. 2024;1(2):100086. https://doi.org/10.1016/j.nexres.2024.100086

2. Табакаев А. В., Табакаева О. В. Характеристика антиоксидантной активности CO_2-экстрактов бурых водорослей и стабилизации липидов. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 3. С. 585–597. [Tabakaev AV, Tabakaeva OV. Antioxidant activity of brown algae CO_2 extracts and lipid stability. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(3):585–597. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2524

3. Yang C, Liu W, Zhu X, Zhang X, Wei Y, *et al*. Ultrasound-assisted enzymatic digestion for efficient extraction of proteins from quinoa. LWT. 2024;194:115784. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115784

4. Долганюк В. Ф., Сухих С. А., Каширских Е. В., Ульрих Е. В., Кремлева О. Е. и др. Скрининг и характеристика антиоксидантных свойств психрофильных микроводорослей и цианобактерий Балтийского моря. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 2. С. 212–221. [Dolganyuk VF, Sukhikh SA, Kashirskih EV, Ulrikh EV, Kremleva OE, *et al*. Screening and profiling the antioxidant properties of psychrophilic microalgae and cyanobacteria from the Baltic Sea. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(2):212–221. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2501

5. Bento-Silva A, Koistinen VM, Mena P, Bronze MR, Hanhineva K, *et al*. Factors affecting intake, metabolism and health benefits of phenolic acids: Do we understand individual variability? European Journal of Nutrition. 2020;59:1275–1293. https://doi.org/10.1007/s00394-019-01987-6

6. Taha FS, Mohamed GF, Mohamed SH, Mohamed SS, Kamil MM. Optimization of the extraction of total phenolic compounds from sunflower meal and evaluation of the bioactivities of chosen extracts. American Journal of Food Technology. 2011;6(12):1002–1020. https://doi.org/10.3923/ajft.2011.1002.1020

7. Ye F, Liang Q, Li H, Zhao G. Solvent effects on phenolic content, composition, and antioxidant activity of extracts from florets of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Industrial Crops and Products. 2015;76:574–581. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2015.07.063

8. Jia W, Kyriakopoulou K, Roelofs B, Ndiaye M, Vincken JP, *et al*. Removal of phenolic compounds from de-oiled sunflower kernels by aqueous ethanol washing. Food Chemistry. 2021;362:130204. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130204

9. Drosou C, Kyriakopoulou K, Bimpilas A, Tsimogiannis D, Krokida M. A comparative study on different extraction techniques to recover red grape pomace polyphenols from vinification byproducts. Industrial Crops and Products. 2015;75(Part B): 141–149. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2015.05.063

10. Scharlack NK, Aracava KK, Rodrigues CEC. Effect of the type and level of hydration of alcoholic solvents on the simultaneous extraction of oil and chlorogenic acids from sunflower seed press cake. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2017;97(13):4612–4620. https://doi.org/10.1002/jsfa.8331

11. Величкович Н. С., Степанова А. А., Козлова О. В., Люц В. А., Ларичев Т. А. Подбор параметров экстракции биоактивных веществ из лекарственных растений с применением молочной сыворотки. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 3. С. 633–644. [Velichkovich NS, Stepanova AA, Kozlova OV, Lutz VA, Larichev TA. Extraction of bioactive substances from medicinal plants with whey: Selecting optimal parameters. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(3):633–644. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2532

12. Zardo I, Sobczyk AE, Marczak LDF, Sarkis J. Optimization of ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from sunflower seed cake using response surface methodology. Waste and Biomass Valorization. 2019;10:33–44. https://doi.org/10.1007/s12649-017-0038-3

13. Chebbi H, Erol TN, Incedayi B, Sari F. Bioactive compounds of fresh tea shoots plucked in different seasons: Optimization of extraction of polyphenols. Journal of Food Measurement and Characterization. 2024;18:4192–4203. https://doi.org/10.1007/s11694-024-02486-x

14. Verstringe S, Vandercruyssen R, Carmans H, Rusu AV, Bruggeman G. Alternative proteins for food and feed. In: Galanakis CM, editor. Biodiversity, Functional Ecosystems and Sustainable Food Production. Cham: Springer; 2023. pp. 325–353. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07434-9_10

15. Parodi E, La Nasa J, Ribechini E, Petri A, Piccolo O. Extraction of proteins and residual oil from flax (*Linum usitatissimum*), camelina (*Camelina sativa*), and sunflower (*Helianthus annuus*) oilseed press cakes. Biomass Conversion and Biorefinery. 2023;13:1915–1926. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01379-z

16. Slabi SA, Mathé C, Framboisier X, Defaix C, Mesieres O, *et al*. A new SE-HPLC method for simultaneous quantification of proteins and main phenolic compounds from sunflower meal aqueous extracts. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2019;411:2089–2099. https://doi.org/10.1007/s00216-019-01635-2

17. Wildermuth SR, Young EE, Were LM. Chlorogenic acid oxidation and its reaction with sunflower proteins to form green-colored complexes. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2016;15(5):829–843. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12213

18. Singh SK, Thakur K, Sharma V, Saini M, Sharma D, *et al*. Exploring the multifaceted potential of chlorogenic acid: Journey from nutraceutical to nanomedicine. South African Journal of Botany. 2023;159:658–677. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.06.038

19. Pelgrom PJM, Boom RM, Schutyser MAI. Method development to increase protein enrichment during dry fractionation of starch-rich legumes. Food and Bioprocess Technology. 2015;8:1495–1502. https://doi.org/10.1007/s11947-015-1513-0

20. Silventoinen P, Rommi K, Holopainen-Mantila U, Poutanen K, Nordlund E. Biochemical and techno-functional properties of protein- and fibre-rich hybrid ingredients produced by dry fractionation from rice bran. Food and Bioprocess Technology. 2019;12:1487–1499. https://doi.org/10.1007/s11947-019-02307-w

21. Silventoinen P, Kortekangas A, Ercili-Cura D, Nordlund E. Impact of ultra-fine milling and air classification on biochemical and techno-functional characteristics of wheat and rye bran. Food Research International. 2021;139:109971. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109971

22. Kuspangaliyeva B, Konakbayeva D, Tabtabaei S. Towards dry fractionation of soybean meal into protein and dietary fiber concentrates. Journal of Food Engineering. 2023;342:111358. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111358

23. Xing Q, Utami DP, Demattey MB, Kyriakopoulou K, Wit M, *et al*. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020;66:102480. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480

24. Gu Y, Qian X, Sun B, Ma S, Tian X, *et al*. Nutritional composition and physicochemical properties of oat flour sieving fractions with different particle size. LWT. 2022;154:112757. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112757

25. Козлова О. В., Величкович Н. С., Фасхутдинова Е. Р., Неверова О. А., Петров А. Н. Методы экстракции иммуномодуляторов растительного происхождения. Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 4.

С. 680–688. [Kozlova OV, Velichkovich NS, Faskhutdinova ER, Neverova OA, Petrov AN. Methods for extracting immune-response modulating agents of plant origin. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(4):680–688. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2468

26. Laudadio V, Bastoni E, Introna M, Tufarelli V. Production of low-fiber sunflower (*Helianthus annuus* L.) meal by micronization and air classification processes. CyTA – Journal of Food. 2013;11(4):398–403. https://doi.org/10.1080/19476337.2013.781681

27. Pelgrom PJM, Schutyser MAI, Boom RM. Thermomechanical morphology of peas and its relation to fracture behaviour. Food and Bioprocess Technology. 2013;6:3317–3325. https://doi.org/10.1007/s11947-012-1031-2

28. Shahidi F, Dissanayaka CS. Phenolic-protein interactions: Insight from in-silico analyses – a review. Food Production, Processing and Nutrition. 2023;5:2. https://doi.org/10.1186/s43014-022-00121-0

29. Ren J, Sun XH, Lin GP, Zheng XQ, Liu XL. Isolation and characterization of sunflower protein isolates and sunflower globulins. In: Zhu E, Sambath S, editors. Information technology and agricultural engineering. Germany: Springer Berlin Heidelberg; 2012. pp. 441–449. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27537-1_54

30. Kedare SB, Singh RP. Genesis and development of DPPH method of antioxidant assay. Journal of Food Science and Technology. 2011;48:412–422. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0251-1

31. Blicharz-Kania A, Pecyna A, Zdybel B, Andrejko D, Marczuk A. Sunflower seed cake as a source of nutrients in gluten-free bread. Scientific Reports. 2023;13:10864. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38094-w

32. Wockenfuss L, Lammers V, Heinz V, Sozer N, Silventoinen-Veijalainen P. Two steps of dry fractionation: Comparison and combination of air classification and electrostatic separation for protein enrichment from defatted rapeseed press cake. Journal of Food Engineering. 2023;357:111623. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111623

33. Pickardt C, Hager T, Eisner P, Carle R, Kammerer DR. Isoelectric protein precipitation from mild-acidic extracts of de-oiled sunflower (*Helianthus annuus* L.) press cake. European Food Research and Technology. 2011;233:31–44. https://doi.org/10.1007/s00217-011-1489-6

34. Mehryar L, Esmaiili M, Zeynali F, Sadeghi R, Imani M. Evaluation of thermal stability of confectionary sunflower protein isolate and its effect on nanoparticulation and particle size of the produced nanoparticles. Food Science and Biotechnology. 2017;26:653–662. https://doi.org/10.1007/s10068-017-0101-7

Дополнительная информация об авторе / Additional information about the author

Крылова Ирина Владимировна / Irina V. Krylova ORCID 0000-0002-0132-2189; eLIBRARY SPIN 1118-9840

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2613
https://elibrary.ru/KLILNT

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Применение сверточных нейронных сетей для контроля показателей технологического потока производства гранулированных киселей

А. В. Шафрай[1,*], А. М. Попов[1], В. С. Косинов[1], И. Ю. Резниченко[2], О. Н. Бондарчук[2]

[1] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

[2] *Кузбасский государственный аграрный университет имени В. Н. Полецкова, Кемерово, Россия*

Поступила в редакцию: 20.08.2025
Принята после рецензирования: 02.10.2025
Принята к публикации: 04.11.2025

**e-mail: shafraia@mail.ru*
© А. В. Шафрай, А. М. Попов, В. С. Косинов, И. Ю. Резниченко, О. Н. Бондарчук, 2025

Аннотация.
Применение искусственного интеллекта в пищевой промышленности становится актуальным. Существуют разные способы цифровизации контроля показателей технологического потока производства продукции. Например, использование нейронных сетей для определения размеров гранул сухого киселя. Цель исследования – применить сверточные нейронные сети для контроля показателей технологического потока производства гранулированных киселей посредством локализации гранул киселя на изображении.
Одним из важнейших параметров готовых гранул сухого киселя является их размер, который должен находится в пределах от 2 до 5 мм. Для разработки модели, определяющей крупные гранулы (более 5 мм), требуется собрать набор данных из изображений гранул разного размера. Выбраны модели локализации объектов из фреймворка Detectron2, которые оптимально справятся с задачей. Описаны принципы работы моделей и качественные показатели для оценки результатов обучения моделей.
Для выявления крупных гранул собран и размечен набор данных из изображений гранул разного размера. Наилучших показателей достигала модель R50-FPN. Наибольшее значение принимала метрика AP50, затем шли AP75 и AP. Модели отлично обучились находить объекты на изображении, достаточно хорошо определяли координаты ограничивающей рамки. В собранном наборе данных отсутствовали размеченные объекты для малых (APs) и средних (APm) размеров, т. к. в исследовании сделан акцент на локализации именно больших гранул. Значения метрики APl для всех моделей находились на высоком уровне. Таким образом, выбранный подход к обучению и архитектуре нейронной сети оказался оптимальным для данной задачи.
На основе обученной модели разработана программа ЭВМ, которая использует сверточные нейронные сети для детекции больших гранул на снимке с продукцией. В дальнейшем она может быть использована на непрерывных производствах для контроля размера готового продукта и его соответствия технологическим параметрам.

Ключевые слова. Искусственный интеллект, нейронные сети, локализация, гранулированные продукты, гранулированные кисели

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

Для цитирования: Шафрай А. В., Попов А. М., Косинов В. С., Резниченко И. Ю., Бондарчук О. Н. Применение сверточных нейронных сетей для контроля показателей технологического потока производства гранулированных киселей. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 845–855. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2613

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2613
https://elibrary.ru/KLILNT

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

Convolutional Neural Networks in Granulated Kissel Production

Anton V. Shafrai[1,*], Anatoliy M. Popov[1], Vitaly S. Kosinov[1], Irina Yu. Reznichenko[2], Olga N. Bondarchuk[2]

[1] *Kemerovo State University, Kemerovo, Russia*

[2] *Kuzbass State Agricultural University, Kemerovo, Russia*

Received: 20.08.2025
Revised: 02.10.2025
Accepted: 04.11.2025

**e-mail: kosinov_vs@mail.ru*

© A.V. Shafrai, A.M. Popov, V.S. Kosinov, I.Yu. Reznichenko, O.N. Bondarchuk,2025

Abstract.
Artificial intelligence can be used to monitor production parameters in the food industry. Kissel is a jelly-like fruit or berry starch drink. Instant kissel usually consists of granules. Neural networks may help to control the size of kissel granules. In this research, convolutional neural networks monitored the production parameters of granulated kissel powder by localizing granules in an image.
Size is the most important parameter of kissel granules: it should remain between 2 and 5 mm. To detects larger granules (≥ 5 mm), the network was provided with a visual dataset of granules of varying sizes. The localization models were developed using Detectron2.
The research yielded a set of optimal operating principles and quality metrics. The R50-FPN model achieved the best results. The AP50 metric had the highest value, followed by AP75 and AP. The models performed well in visual detection and successfully determined the coordinates of the bounding rectangle. The resulting dataset did not label objects for small (APs) and medium (APm) sizes because the study focused on localizing large granules. The APl metric values for all models were high. The approach to AI training and neural network architecture proved optimal for food production control.
The trained model made it possible to develop a computer program based on convolutional neural networks that demonstrated good results in detecting large granules in instant kissel powder. The new program can be used in continuous production to monitor the size of finished products and their compliance with process parameters.

Keywords. Artificial intelligence, neural networks, localization, granulated products, granulated kissel

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

For citation: Shafrai AV, Popov AM, Kosinov VS, Reznichenko IYu, Bondarchuk ON. Convolutional Neural Networks in Granulated Kissel Production. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):845–855. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2613

Введение

Применение искусственного интеллекта в промышленности стало одним из ключевых трендов цифровой трансформации различных отраслей. В пищевой промышленности внедрение искусственного интеллекта открывает широкие возможности для автоматизации процессов, повышения точности контроля качества, оптимизации производственных мощностей и моделирования параметров как используемых ресурсов, так и производимой продукции [1–3]. Особенно перспективным направлением является использование нейронных сетей и машинного обучения для анализа больших объемов данных, получаемых в режиме реального времени с датчиков оборудования и линий производства [4]. Такие технологии позволяют не только выявлять отклонения от нормы на ранних стадиях, но и предсказывать возможные сбои, что способствует снижению брака и увеличению общей рентабельности производства.

В частности, производство гранулированных продуктов, таких как кисели, представляет собой сложный технологический процесс, требующий строгого соблюдения параметров сырья, температурного режима, влажности и других факторов. На сегодняшний день в этой области недостаточно внедрены современные методы искусственного интеллекта, несмотря на растущий запрос со стороны предприятий на автоматизированное управление качеством [5]. Внедрение систем на основе нейросетей позволит осуществлять непрерывный контроль за состоянием продукции, распознавать дефекты гранул по визуальным и физико-химическим характеристикам, а также адаптировать параметры производства

под изменяющиеся условия в автоматическом режиме. Это не только повысит стабильность выпускаемой продукции и ее соответствие стандартам, но и снизит затраты на контроль технологического потока, увеличив экономическую эффективность производства.

Цель исследования – применить сверточные нейронные сети для контроля показателей технологического потока производства гранулированных киселей посредством локализации гранул киселя на изображении. Для выполнения цели определен ряд задач:

1. Подготовить набор данных (датасет) гранул различных размеров.

2. Обучить сверточную нейронную сеть на подготовленном наборе данных.

3. Провести оценку качества работы модели.

4. Разработать программное обеспечение на основе обученной сети.

Таким образом, выполнение указанных задач позволит оценить возможности нейронных сетей, способных локализовать гранулы киселя на изображении, что откроет возможности для дальнейшего анализа их характеристик и повышения общего уровня цифровизации контрольных операций на производстве.

Объекты и методы исследования

Технологическая схема производства быстрорастворимых гранулированных киселей представлена на рисунке 1. Она включает несколько основных стадий, каждая из которых направлена на обеспечение высокого качества конечного продукта. Одним из наиболее определяющих этапов в этой схеме является процесс гранулирования.

Существует несколько методов гранулирования. Один из наиболее популярных в пищевой промышленности – гранулирование методом окатывания. Оно реализуется в специальных аппаратах (грануляторы-окатыватели). Основные виды таких устройств – тарельчатые и барабанные установки. Принцип их работы заключается в подъеме материала на определенную высоту за счет вращательного движения рабочей поверхности с последующим скатыванием вниз под действием силы тяжести частиц, формирующих гранулы. К ключевым факторам, обуславливающим низкое удельное энергопотребление процесса, относится то, что значительная часть энергии расходуется на преодоление потенциальной энергии, то есть на подъем материала. При скатывании происходят многочисленные взаимодействия между гранулами, частицами исходного материала и внутренними поверхностями аппарата, что способствует уплотнению и росту гранул. Подъем обеспечивается за счет комбинации центробежных сил и сил трения между частицами и поверхностью гранулятора.

Тарельчатый гранулятор представляет собой вращающуюся чашу с бортом, установленную под углом 35–55° к горизонту. Внутри нее материал движется по сложной спиральной траектории. На частицу действуют сила тяжести, центробежная сила, силы трения о дно и борт, а также реакция дна. При достижении определенной высоты частица отрывается от борта и скатывается вниз, образуя восходящую и нисходящую ветви движения. В процессе окатывания наблюдается сегрегация по крупности: мелкие фракции остаются у дна, более крупные – выше, а самые крупные гранулы движутся вблизи борта.

Эффективность тарельчатого гранулятора во многом зависит от того, насколько полно используется площадь дна чаши. Исследования показали [6], что максимальная эффективность достигается, когда мелкие частицы отрываются от борта в самой верхней точке. Это условие выполняется при определенном соотношении частоты вращения, диаметра тарели, углов ее наклона и естественного откоса материала. С увеличением частоты вращения для сохранения оптимального отрыва необходимо увеличивать угол наклона, что, в свою очередь, повышает высоту скатывания и силу удара гранул в нижней точке.

Для предотвращения смещения материала к борту при высоких оборотах и обнажения дна применяют меры по увеличению трения. Например, футеруют тарель резиной или поддерживают слой гарниссажа, представляющего собой тонкий слой материала на дне. Гарниссаж не только повышает сцепление, но и защищает поверхность от абразивного износа, а также выполняет демпфирующую функцию при колебаниях влажности, поглощая избыток жидкости и постепенно ее отдавая. Такой режим особенно важен при мокром гранулировании.

В процессе окатывания происходят существенные изменения в структуре дисперсной системы. Исходная



Рисунок 1. Схема технологического потока быстрорастворимых гранулированных киселей

Figure 1. Instant kissel production

рыхлая масса с трехфазной структурой постепенно переходит в плотную гранулу. При этом жидкая фаза перераспределяется: из пленочного и капиллярно-стыкового состояния она переходит в поровое пространство, формируя капиллярную воду в фуникулярном состоянии. В зонах контакта каркасных зерен концентрируются ультрадисперсные частицы, образуя структурированную суспензию с высокими реологическими свойствами. Эта псевдофаза имеет тиксотропные характеристики и помогает повысить прочность гранул за счет капиллярно-молекулярного механизма связи.

Рост и уплотнение гранул напрямую зависят от скорости капиллярного влагообмена. Поверхность растущей гранулы должна быть слегка переувлажнена, чтобы обеспечить налипание новых частиц. Избыток влаги вытесняется из ядра гранулы как за счет капиллярного потенциала, так и за счет механического выдавливания. На конечной стадии, когда гранула сформирована, происходит релаксация напряжений и выравнивание градиентов плотности и влажности по объему. В это время поровая суспензия переходит в устойчивое коагуляционно-структурированное состояние.

Механизм гранулообразования зависит от выбранного способа: сухой, полумокрый или мокрый. Мокрый способ подразумевает, что материал изначально содержит достаточное количество влаги, частицы соединены менисками жидкости и могут перемещаться, образуя более плотную укладку. Зародыши гранул формируются случайным образом из увлажненных комков, которые затем уплотняются. Рост гранул происходит за счет налипания мелких агломератов, разрушающихся в процессе окатывания. Условие присоединения частицы к грануле определяется соотношением ее диаметра, радиуса гранулы и угла трения. При перекатывании гранулы через частицу развивается значительное давление, достигающее сотен атмосфер, что способствует вдавливанию частицы и уплотнению структуры.

При сухом способе влага подается распылением. Капли жидкости вызывают локальное слипание частиц, образуя зародыши. Эти комки оказываются переувлажненными, и при окатывании избыток жидкости вытесняется на поверхность, обеспечивая налипание новых частиц. Однако при наличии растворимых компонентов процесс усложняется. По мере растворения твердой фазы объем жидкой фазы увеличивается, что приводит к размягчению и разрушению гранул. Это свидетельствует о том, что для устойчивого гранулирования важно не только количество влаги, но и ее подвижность в структуре.

Эксперименты показали, что, несмотря на малое содержание, ультрадисперсные фракции играют ключевую роль в формировании прочной структуры. Они концентрируются в точках контакта зерен, образуя малоподвижную суспензию, в то время как влага перемещается в виде раствора. Это означает, что именно динамика жидкой фазы при уплотнении каркаса определяет эффективность процесса.

Таким образом, процесс окатывания представляет собой сложное сочетание механических, капиллярных и реологических явлений, зависящих от свойств материала, режимных и конструкционных параметров оборудования. Гранулометрический состав влажных гранул, получаемых окатыванием, легко регулируется, обеспечивая узкий диапазон размеров при диаметре от 5 до 30 мм за счет технологической классификации на тарели гранулятора. Размер выходящих гранул определяется высотой борта. Указанные размеры гранулята не отвечают концепции нашей работы создания быстрорастворимых сухих концентратов, исходя из которых размер гранул должен быть 1–3 мм [6].

Технологический поток оценивается по наиболее важным технологическим показателям промежуточных и готового продуктов на разных стадиях производства. Показатели и их допустимые значения определяются экспертами, например, технологами и инженерами производства. В данном исследовании в качестве оцениваемого параметра выбран размер гранул. При производстве киселей количество готовых гранул (больше 5 мм) не должно превышать 10 %. Поэтому далее нейронную сеть обучали для распознавания таких гранул.

Приведем общую последовательность действий для формирования набора данных, выбора метода обучения и построения модели (рис. 2).

1. Создание набора данных, содержащего изображения и их разметку:
– собирается достаточный набор изображений, определяются их размеры и размеры, которые будут использоваться в обучении (т. к. некоторые архитектуры нейронных сетей работают с изображениями определенного размера), изображения форматируются под требуемые размеры;
– полученные изображения размечаются (под разметкой следует понимать присвоение аннотации, метки или тега элементу/ам, находящимся на изображении), присвоенный индикатор и будет являться целевым значением;
– очень часто собрать необходимый объем данных для обучения затруднительно. В таком случае прибегают к аугментации, имеющиеся размеченные изображения проходят набор трансформаций: вращение исходных изображений, инверсия, зеркалирование и т. д. Таким образом в разы увеличивается объем датасета, а получаемая модель учится реагировать на различные варианты одних и тех же изображений, тем самым, приобретает лучшие обобщающие качества.

2. Импорт всех необходимых библиотек для работы с датасетом и нейронными сетями.

3. Начало итерационного процесса подбора архитектуры, гиперпараметров и параметров обучения:
– выбирается архитектура нейронной сети, причем выбирается как семейство, так и конкретная модель. Например, у архитектуры ResNet есть несколько модификаций: ResNet18, ResNet32, ResNet50 и т. д. Чаще



Рисунок 2. Принципиальная схема применения нейронных сетей

Figure 2. Neural networks: Application scheme

всего различия между видами одной архитектуры заключаются в количестве скрытых слоев. Поэтому выбирают подходящий вид архитектуры (на основании дальнейшего использования можно сделать вывод: чем больше слоев, тем больше вычислительных мощностей потребуется в конечном использовании), затем из разных семейств берутся схожие по размерам модели для дальнейшего тестирования. Так как в основном используется технология дообучения, модели берутся уже обученные (в данном случае на датасете ImageNet), с готовыми весами. Такие модели уже способны классифицировать изображения на 1000 классов;

– последние слои выбранных моделей изменяются под решаемую задачу. Чаще всего готовые модели классифицируют на 1000 заранее определенных классов. Поэтому под конкретную задачу последние слои (они идут полносвязные) переписываются. Например, если требуется классификация на 2 класса: норма / брак, то необходим один выходной нейрон, который будет предсказывать вероятность брака: 0 – норма, 1 – брак. Далее сеть дообучают на собранном датасете;

– подбирают гиперпараметры, в число которых входит функция потерь, оптимизатор, регуляризаторы, приемы обучения, такие как дроп-аут или батч-нормализация;

– начинается обучение с подбором параметров (например, размер батчей, количество эпох, размеры тренировочной, валидационной и тестовой выборки и др.);

– подбираются метрики, по которым судят об успешности той или иной комбинации всех переменных и точности обученной модели. Все подпункты пункта 3 обозначают итерационный процесс, который длится до достижения желаемой точности модели, в большинстве случаев представляя из себя полный перебор всех возможных комбинаций.

Для успешного обучения нейронной сети необходимо предварительно собрать и подготовить соответствующий набор данных – датасет. Он представляет собой совокупность изображений, на которых представлены объекты, подлежащие распознаванию моделью, в данном случае – отдельные гранулы киселя.

Снимки гранул сделаны на производственной площадке компании ООО «НПО Здоровое Питание» (Кемерово, Россия), что позволило обеспечить высокую репрезентативность данных относительно реальных условий производства. Для сбора изображений использовалась цифровая камера D5300 kit 18-140mm (Nikon, Япония), установленная на этапе сушки гранул после гранулирования. Изображения сделаны при различном освещении и ракурсах, чтобы обучаемая модель могла корректно обрабатывать данные вне зависимости от внешних факторов. На каждом снимке можно наблюдать как отдельные, так и сгруппированные гранулы, различающиеся по размеру, форме и степени однородности поверхности. Это позволяет модели

лучше учитывать вариативность продукта и повышает ее устойчивость к сложным случаям распознавания. Полученные изображения затем объединяли в единый структурированный датасет, который стал основой для дальнейшего этапа – его разметки и последующего обучения нейросетевой модели.

Для получения целевых значений, требуемых для обучения нейронных сетей детектированию крупных гранул, полученные снимки размечали. Для задачи локализации крупных частиц на изображении требуется присвоить метку каждой крупной грануле. Разметка осуществлялась в программе для аннотирования изображений и видео Computer Vision Annotation Tool. Созданная разметка может быть сохранена в различных форматах, используемых для обучения нейронных сетей. В данной работе разметка сохранена в формате COCO 1.0. Целевые значения хранились в файле формата json, содержащего информацию об изображении, включая путь к файлу, размер и список аннотированных объектов.

Нейронные сети представляют собой вычислительные модели, которые состоят из взаимосвязанных узлов, называемых нейронами. Они способны обучаться на основе получаемых данных [7]. Нейронные сети используются при решении различных задач, в число которых входит локализация объектов на изображении. Существует несколько типов нейронных сетей (архитектур нейронных сетей), для работы с изображениями применяются сверточные нейронные сети (СНС). Они способны анализировать не только сами данные, но и их взаимное расположение. Такая особенность необходима при исследовании изображений, потому что они состоят из пикселей. Именно расположение пикселей создает объекты, которые человек воспринимает на изображении.

Кроме того, СНС представляют собой достаточно большие модели по количеству параметров, поэтому их разработка и обучение является очень сложным и затратным процессом, доступным крупным технологическим компаниям и исследовательским организациям. В связи с этим для решения прикладных задач используют уже готовые и обученные модели различных архитектур. Их дообучают под решение конкретных примеров. Такая технология называется transfer learning.

Mask R-CNN является одной из самых современных и эффективных моделей СНС, применяемой для задачи локализации (instance segmentation) [8]. Mask R-CNN позволяет не только определить класс объекта, но и выделить его на изображении. Модель Mask R-CNN разработана исследовательской группой Facebook как развитие более ранних архитектур, таких как R-CNN, Fast R-CNN и Faster R-CNN [9].

В рамках данного исследования модель Mask R-CNN реализована с помощью фреймворка Detectron2, который базируется на библиотеке PyTorch и предоставляет гибкие инструменты для обучения и тестирования моделей instance segmentation. Detectron2 рассчитан на работу с RGB-изображениями в традиционных форматах, таких как png или jpeg.

Работа модели Mask R-CNN строится на двух основных этапах. На первом этапе модель анализирует изображение и предлагает участки, которые потенциально содержат объекты. Этот процесс осуществляется с помощью сети предложений регионов (RPN) [10]. На втором этапе каждый из участков детально обрабатывается: модель определяет, к какому классу он относится, уточняет границы объекта и строит точную маску его формы. Таким образом, Mask R-CNN объединяет в себе сразу три задачи: обнаружение, классификацию и сегментацию.

Основной частью модели, получающей изображение и извлекающей из него признаки, является backbone-сеть. В Detectron2 представлено большое количество backbone-сетей. В текущей работе протестированы несколько модификаций backbone-сети ResNet50: R50-C4, R50-DC5 и R50-FPN. Данные модификации backbone-сети имеют наилучшие показатели среди всех моделей, представленных в Detectron2.

Модель R50-C4 использует выход только четвертого уровня ResNet50 (C4) в качестве финальной карты признаков (рис. 3). Такой подход обеспечивает высокую скорость работы и относительно низкие требования к вычислительным ресурсам, что делает ее хорошим выбором для задач, где важна производительность. Модель R50-DC5 является модификацией R50-C4, в которой последний уровень сети (C5) адаптирован с помощью дилатационных сверток для сохранения более высокого пространственного разрешения (рис. 3). Это позволяет улучшить качество обнаружения мелких объектов.

Наиболее продвинутым решением является модель R50-FPN, в которой используется сеть пирамидальных признаков (FPN) [11]. Данный механизм объединяет информацию со всех уровней ResNet50 (C2–C5). FPN строит пирамиду P2–P5, где каждый уровень отвечает за определенный диапазон масштабов объектов (рис. 3). Это позволяет эффективно работать как с крупными, так и с мелкими объектами, обеспечивая наивысшую точность среди перечисленных моделей.

После того как backbone извлекает признаки изображения, данные передаются в RPN, которая генерирует anchor box. Это набор прямоугольников, внутри которых потенциально могут находиться целевые объекты. Создаются anchor box разных размеров и пропорций, чтобы охватить как можно больше возможных вариантов расположения объектов на изображении. Для каждого такого региона модель рассчитывает вероятность наличия в нем объекта и корректирует координаты, чтобы точнее его локализовать.

Полученные таким образом области интереса (ROI) далее подвергаются процессу выравнивания (ROI Align). Этот шаг необходим для того, чтобы привести все найденные области к единому размеру, сохранив

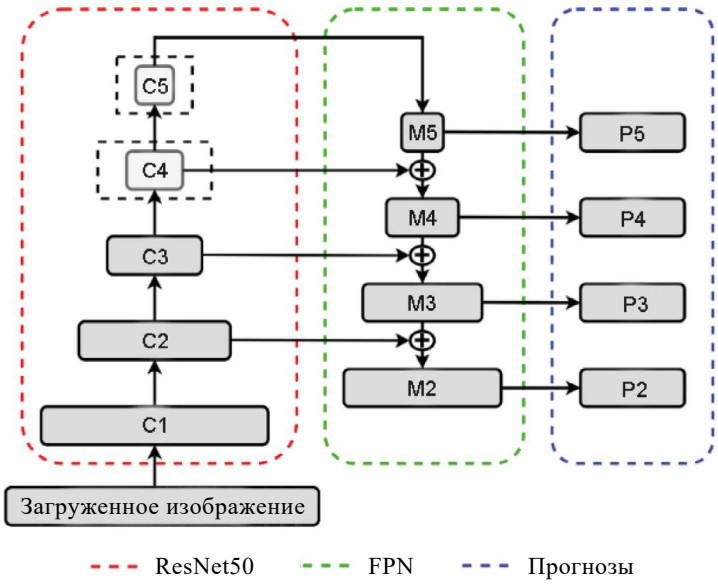


Рисунок 3. Вид backbone-сети, показывающий комбинацию архитектуры ResNet50 с сетью пирамидальных признаков (FPN) и прогнозами

Figure 3. ResNet50 architecture with pyramidal feature network (FPN) and forecasts: Backbone network view

при этом точное пространственное положение объекта. В отличие от более раннего метода ROI Pooling, ROI Align использует билинейную интерполяцию, которая не теряет информацию о расположении пикселей, что особенно важно при построении точных масок сегментации.

После выравнивания каждую ROI приводят к стандартному размеру с помощью операции ROI Align, затем направляют сразу в три параллельных выхода: для определения класса объекта, уточнения координат ограничивающих рамок объекта и построения маски. Все эти шаги происходят одновременно, что делает модель достаточно эффективной даже на сложных изображениях. Таким образом, Mask R-CNN объединяет в одном алгоритме сразу несколько задач: обнаружение, классификацию, а также сегментацию. Описанная организация позволяет модели не только находить объекты, но и точно выделять их форму, даже в том случае, если они частично перекрываются другими объектами.

В процессе обучения модель оптимизирует несколько целевых функций, отвечающих за разные аспекты задачи сегментации. Общая функция потерь рассчитывается по формуле (1) [12]:

$$L = L_{\text{mask}} + L_{\text{cls}} + L_{\text{bbox}} \quad (1)$$

где L_{mask} – функция потерь маски; L_{cls} – функция потерь классификации; L_{bbox} – функция потерь регрессии координат ограничивающей рамки.

Функции потерь маски и классификации рассчитываются по формуле (2):

$$L_{\text{mask}} \text{ и } L_{\text{cls}} = \sum_{i=1}^{N} y_i \times \log\left(p\left(y_i\right)\right) + \\ + \left(1 - y_i\right) \times \log\left(1 - p\left(y_i\right)\right) \quad (2)$$

Функция потерь регрессии координат ограничивающей рамки рассчитывается по формуле (3):

$$L_{\text{bbox}} = \sum_{i=1}^{N} \left| y_{\text{true}} - y_{\text{pred}} \right| \quad (3)$$

Модель Mask R-CNN обучается таким образом, чтобы минимизировать ошибки сразу по всем компонентам, это позволяет ей одновременно улучшать качество как обнаружения объектов, так и их детального описания.

Еще одним важным этапом в процессе обучения нейронной сети является выбор подходящих гиперпараметров. От их настройки зависит не только скорость сходимости, но и конечное качество модели. В качестве оптимизатора выбрали стандартную настройку Adam с начальной скоростью обучения, равной 0,001. Эта скорость уменьшалась в десять раз после 1000 итераций, чтобы помочь модели лучше сойтись. Также использовался параметр momentum, равный 0,9, который помогал ускорить обучение в нужном направлении. Для каждого изображения обрабатывалось по 128 ROI, чтобы натренировать модель достаточно точно оценивать объекты разного размера. Обучение проводилось в течение 5000 эпох, при этом на каждом шаге отслеживалось значение функции потерь на валидационной выборке для своевременной остановки обучения, как только модель переставала улучшаться. Для более стабильной начальной фазы обучения приме-

нялось 1000 итераций warm-up – на этом этапе скорость обучения постепенно увеличивалась от очень малого значения (0,001) до установленного уровня. Такой подход помог моделям легче адаптироваться к данным и избежать резких скачков весов на ранних этапах.

Расширение датасета за счет аугментации – важный этап при обучении модели нейронной сети. Она представляет собой применение различных преобразований к изображению и его аннотации. Данный подход важен при работе с малыми наборами данных. К изображениям в собранном датасете применяли следующие преобразования:
– RandomFlip – случайное отражение изображения по горизонтали или вертикали;
– RandomBrightness – случайное изменение яркости;
– RandomContrast – случайное изменение контраста;
– RandomSaturation – случайное изменение насыщенности цветов.

Эти преобразования позволяли модели лучше обобщать данные и быть устойчивой к различиям в освещенности и размерах объектов, которые могут встречаться в реальных условиях.

Как упоминалось ранее, для работы использовали набор данных, представленный в формате COCO 1.0 – стандартизированном и широко применяемом формате для задач компьютерного зрения. Одно из ключевых преимуществ этого формата – наличие единой системы оценки качества моделей, что обуславливает корректность сравнения различных архитектурных и подходов.

Для оценки эффективности СНС в рамках COCO используется несколько стандартных метрик, основной из которых является средняя точность (AP) [13]. В отличие от традиционных методов, где используется фиксированный порог перекрытия предсказанной области с истинной (IoU) [14], в COCO вычисляется усредненное значение AP по нескольким порогам IoU (от 0,50 до 0,95 с шагом 0,05). Данное обстоятельство делает оценку более строгой и объективной, т. к. модель должна показывать стабильно высокие результаты на разных уровнях точности локализации.

Кроме общей метрики AP, также рассматриваются следующие показатели:
– AP50 – значение средней точности при IoU = 0,50;
– AP75 – значение средней точности при IoU = 0,75.

На основе приведенных метрик можно оценить работу модели при разной степени строгости к положению и размеру предсказанных ограничивающих рамок объекта.

Дополнительно проводили анализ качества модели в зависимости от размера распознаваемых объектов:
– APs – средняя точность для маленьких объектов (менее 32^2 пикселей);
– APm – средняя точность для объектов среднего размера (от 32^2 до 96^2 пикселей);
– APl – средняя точность для больших объектов (более 96^2 пикселей).

Такая детализация давала понимание об эффективности модели в распознавании объектов различного размера, что особенно важно в задачах контроля качества, где необходима точность определения как мелких, так и крупных частиц.

Для обучения модели определили комплекс оборудования и программного обеспечения:
– операционная система: Windows 10 (версия 10.0. 19041 SP0) – из-за стабильности и удобства работы;
– интерпретатор: Python 3.8.12, ввиду широкой поддержки библиотек машинного и глубокого обучения и устойчивости версии;
– среда разработки: облачная платформа Google Colab, обеспечивающая доступ к GPU, облачному хранению данных и удобной работе с Jupyter-блокнотами.

Выбранный комплекс позволил эффективно реализовать процесс обучения нейросетевой модели.

Результаты и их обсуждение

Сделано 30 снимков, содержащих как крупные гранулы (более 5 мм), так и мелкие (менее 5 мм). Размер полученных изображений составил 4320×3240 пикселей. Данные снимки разбивали на 16 частей равного размера. Таким образом, объем изображений в наборе обучающих данных увеличился до 480. Размер изображений в данном случае стал равен 810×810 пикселей. Позже изображения сжимали до размера 512×512 пикселей. Далее размещали 480 изображений, содержащих гранулы большого и малого размеров (рис. 4). Большим гранулам присваивали тег bigGranule.

После завершения процесса обучения сверточной нейронной сети (СНС) получены и проанализированы количественные показатели ее точности. Основными метриками оценки качества модели стали различные значения средней точности (AP), которые дают комплексное представление об эффективности обнаружения гранул на изображении. Результаты, отражающие значение метрик при различных порогах перекрытия

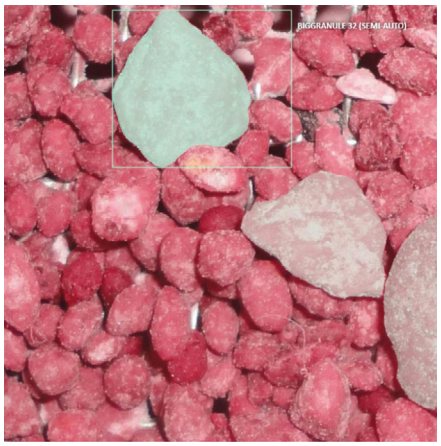


Рисунок 4. Пример разметки больших гранул

Figure 4. Marking larger granules

предсказанной области с истинной (IoU) и размерах объектов, представлены в таблице.

Наилучших показателей достигала модель R50-FPN. Для каждой модели наибольшее значение принимала метрика AP50, затем шли AP75 и AP. Это говорит о том, что модели отлично обучились находить объекты на изображении и достаточно хорошо определяют координаты ограничивающей рамки. Исходя из того, что в исследовании был сделан акцент на локализации гранул именно большого размера, было ожидаемо, что в результате обучения будут отсутствовать значения показателей средней точности для малых (APs) и средних (APm) объектов. Как следствие, модель не обучалась локализации объектов такого размера. Значения метрики APl для всех моделей находились на высоком уровне. Это указывает на то, что выбранный подход к обучению и архитектуре нейронной сети оказался оптимальным для данной задачи.

Обученная модель сохранена, для нее разработан интерфейс, позволяющий пользователю загружать и исследовать снимки готовых гранул. Программный код зарегистрировали в качестве программы ЭВМ № 2025680149.

Программа принимает на вход изображение с гранулами. После обработки на выходе формируется размеченное изображение, на котором каждая обнаруженная гранула выделена рамкой. Цвет рамки соответствует отдельной грануле, рядом выводится текстовая метка и значение вероятности, с которой модель отнесла объект к данному классу. Программа работает стабильно и быстро (до 5 секунд на анализ изображения). Она способна обрабатывать изображения в различных форматах. Предусмотрена возможность работы как с отдельными снимками, так и с несколькими изображениями. Это делает ее удобной для использования в промышленных условиях, где требуется анализ большого количества данных. Обработка выполняется последовательно: сначала изображение загружается; проходит этап предварительной обработки (нормализация, изменение размера, устранение шумов); запускается модель с загруженными весами, которая выполняет детекцию и классификацию объектов. Результаты визуализируются и сохраняются в указанную директорию.

Для наглядности представлены блок-схема алгоритма и интерфейс программы. Блок-схема отражает последовательность всех этапов обработки: от загрузки изображения до вывода размеченного результата. Каждый блок соответствует определенному этапу работы (рис. 5).

Таблица. Значения метрик после процедуры обучения

Table. Metric values after training

	AP	AP50	AP75	APs	APm	APl
R50-C4	80,877	83,236	82,111	–	–	80,886
R50-DC5	81,541	84,112	82,556	–	–	81,590
R50-FPN	81,908	84,328	83,165	–	–	81,237

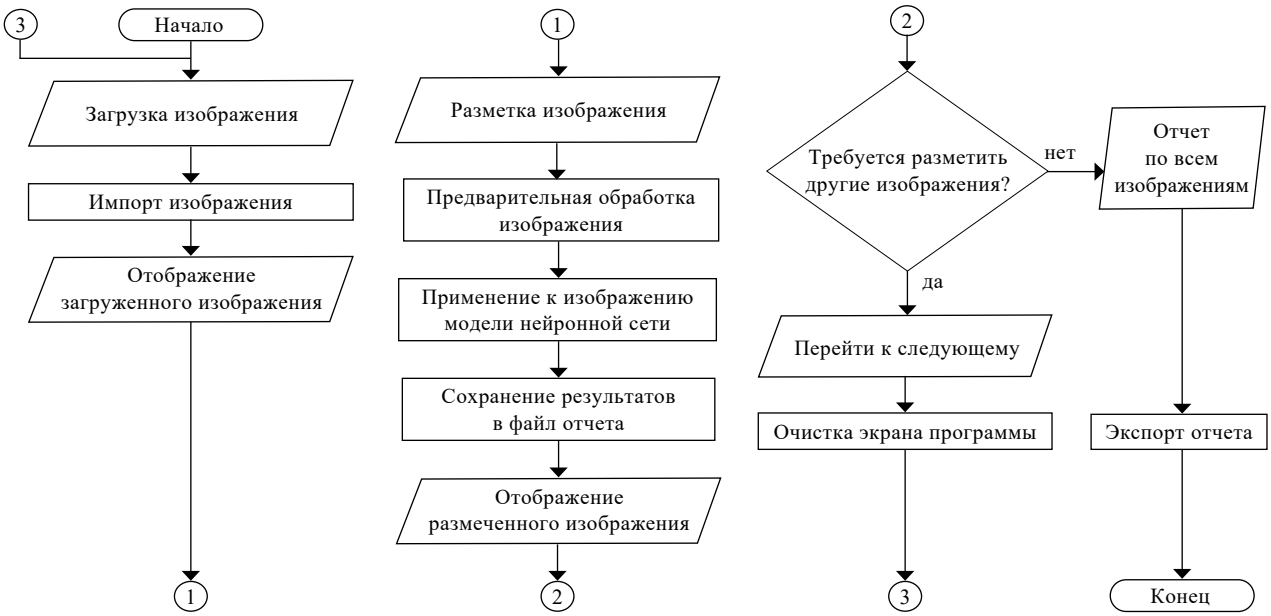


Рисунок 5. Алгоритм работы программы

Figure 5. Operation algorithm: Block diagram

Интерфейс программы, представленный на рисунке 6, выполнен в виде окна с минимальным набором элементов.

Пользователь может выбрать файл, нажав на кнопку «загрузить изображение». После чего выбранное изображение отобразится слева. Далее можно запустить анализ изображения, нажав «разметить изображение». Обработанное изображение отобразится справа. Результаты обработки сохраняются в отдельный файл с отчетом. Если пользователь хочет разметить другие изображения, то для этого требуется выбрать «перейти к следующему». В результате чего поля с изображениями очистятся, и пользователь сможет повторить процедуру для другого изображения. Генерация отчета для любого количества рассмотренных пользователем изображений происходит после нажатия кнопки «отчет по всем изображениям». Интерфейс довольно простой, интуитивно понятный, не требует специальных знаний для эксплуатации.

Выводы

В ходе проделанной работы собран и подготовлен обучающий набор данных, состоящий из изображений различных типов гранул. Все изображения размечены вручную – на каждом изображении определены гранулы, превышающие допустимый размер, что позволило обучить модель распознавать их самостоятельно.

Для решения задачи разработки модели выбрали одну из современных моделей сверточных нейронных сетей (СНС), подходящую для задачи локализации объектов на изображении. Рассмотрены три модификации данной модели, которые прошли несколько этапов обучения, включая подбор оптимальных гиперпараметров, аугментацию данных для улучшения обобщающей способности и финальное тестирование на отдельной выборке.

Результаты показали высокую точность модели: она успешно распознавала гранулы большого размера, наличие которых может указывать на нарушения в процессе производства гранулированного киселя. Таким образом, СНС могут использоваться в процессе производства гранулированного киселя для контроля технологического потока.

На основе обученной модели разработана программа ЭВМ, которая использует СНС для детекции больших гранул на снимке с продукцией. В дальнейшем она может оказать пользу на непрерывных производствах для контроля размера готового продукта и его соответствия технологическим параметрам. В таком случае на входе программе сразу будет передаваться видеопоток, и потребуется некоторая перестройка архитектуры. Данный аспект является задачей автоматизации производства, поэтому не рассматривался в данном исследовании.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

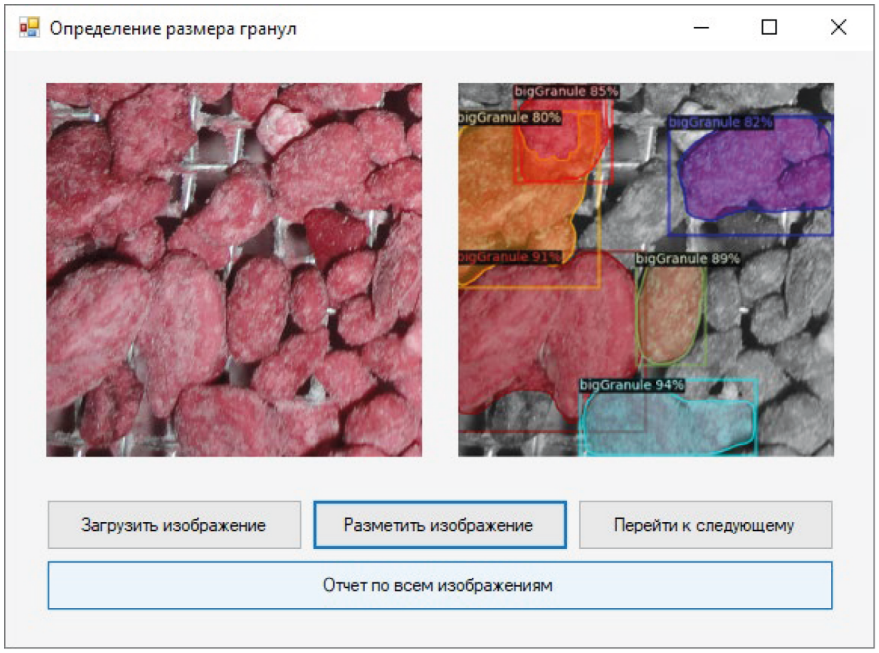


Рисунок 6. Интерфейс разработанной программы

Figure 6. Program interface

Contribution

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

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Shafrai AV, Permyakova LV, Borodulin DM, Sergeeva IY. Modeling the physiological parameters of brewer's yeast during storage with natural zeolite-containing tuffs using artificial neural networks. Information. 2022;13(11):529. https://doi.org/10.3390/info13110529

2. Королев И. А. Автоматизированное определение дисперсности воздушной фазы в мороженом с применением методов машинного обучения. Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 455–464. [Korolev IA. automated measurement of air bubbles dispersion in ice cream using machine learning methods. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):455–464. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2448

3. Jo DM, Han S-J, Ko S-C, Kim KW, Yang D, *et al*. Application of artificial intelligence in the advancement of sensory evaluation of food products. Trends in Food Science & Technology. 2025;165:105283. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105283

4. Михеев П. Н. Технологии искусственного интеллекта в пищевой промышленности. Инновации и инвестиции. 2023. № 4. С. 536–539. [Mikheev PN. Artificial intelligence technologies in the food industry. Innovation & Investment. 2023;(4):536–539. (In Russ.)] https://elibrary.ru/DYOHTS

5. Лындина М. И. Пути совершенствования пищеконцентрантной отрасли. Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2020. № 13. С. 157–163. [Lyndina MI. Ways to improve the food industry. Material assets for government needs: Innovative production and storage. 2020;(13):157–163. (In Russ.)] https://elibrary.ru/DHQPUP

6. Попов А. М. Анализ и синтез технологий гранулированных концентратов напитков. Кемерово: КемТИПП; 2003. С. 133–148. [Popov AM. Granulated beverage concentrates: Technological analysis and synthesis. Kemerovo: KemTIPP; 2003. pp. 133–148. (In Russ.)]

7. Ксенофонтов В. В. Нейронные сети. Проблемы науки. 2020. № 11. С. 28–29. [Ksenofontov VV. Neural networks. Problems of science. 2020;(11):28–29. (In Russ.)] https://elibrary.ru/DTVJNS

8. Hassan E, El-Rashidy N, Talaat FM. Mask R-CNN models. Nile Journal of Communication and Computer Science. 2022;3(1):17–27. https://doi.org/10.21608/njccs.2022.280047

9. Olorunshola OE, Jemitola PO, Ademuwagun A. Comparative study of some deep learning object detection algorithms: R-CNN, fast R-CNN, faster R-CNN, SSD, and YOLO. Nile Journal of Engineering and Applied Science. 2023;1(1):70–80. https://doi.org/10.5455/NJEAS.150264

10. Prakash SR, Singh PN. Object detection through region proposal based techniques. Materials Today: Proceedings. 2021;46(9):3997–4002. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.533

11. Zhu L, Lee F, Cai J, Yu H, Chen Q. An improved feature pyramid network for object detection. Neurocomputing. 2022;483:127–139. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.02.016

12. Xavier AI, Villavicencio C, Macrohon JJ, Jeng J-H, Hsieh J-G. Object detection via gradient-based mask R-CNN using machine learning algorithms. Machines. 2022;10(5):340. https://doi.org/10.3390/machines10050340

13. Jabir B, Falih N, Rahmani K. Accuracy and efficiency comparison of object detection open-source models. International Journal of Online and Biomedical Engineering. 2021;17(5):165–184. https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i05.21833

14. Peng H, Yu S. A systematic IOU-related method: Beyond simplified regression for better localization. IEEE Transactions on Image Processing. 2021;30:5032–5044. https://doi.org/10.1109/TIP.2021.3077144

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Шафрай Антон Валерьевич / Anton V. Shafrai ORCID 0000-0003-4512-1933; eLIBRARY SPIN 1840-5242
Попов Анатолий Михайлович / Anatoliy M. Popov ORCID 0000-0003-0728-7211; eLIBRARY SPIN 6259-7555
Косинов Виталий Сергеевич / Vitaly S. Kosinov ORCID 0009-0005-5852-9809; eLIBRARY SPIN 8397-7880
Резниченко Ирина Юрьевна / Irina Yu. Reznichenko ORCID 0000-0002-7486-4704; eLIBRARY SPIN 9847-5357
Бондарчук Ольга Николаевна / Olga N. Bondarchuk ORCID 0009-0000-0820-5965; eLIBRARY SPIN 8789-9262

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2610
https://elibrary.ru/GYNFWZ

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Ветеринарно-санитарная экспертиза продукции из воблы (*Rutilus rutilus caspicus*)

М. В. Сытова*, Н. Ю. Терпугова, Н. С. Мюге

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 27.07.2025
Принята после рецензирования: 26.09.2025
Принята к публикации: 07.10.2025

**e-mail: m_sitova@vniro.ru*
© М. В. Сытова, Н. Ю. Терпугова, Н. С. Мюге, 2025

Аннотация.
Отсутствие современных данных по показателям качества и безопасности продукции из воблы (*Rutilus rutilus caspicus*), запасы которой в настоящее время находятся в депрессивном состоянии, привело к необходимости проведения комплексных исследований. Цель работы – комплексная оценка влияния антропогенных, патогенных, инвазионных и иных факторов на состояние популяции воблы, качество и безопасность продукции из нее с учетом современных требований ветеринарно-санитарной экспертизы для предотвращения реализации некачественной и опасной продукции, защиты жизни и здоровья населения.
Объектами исследования послужили вобла свежая и вяленая Волго-Каспийского региона. Сбор, обработка и анализ биологического материала осуществлялись по общепринятой методике рыбохозяйственных исследований в части изучения промысловых популяций рыб. Исследование включало органолептическую, физико-химическую, микробиологическую, паразитологическую и видовую (ДНК-штрихкодирование) оценку воблы и продукции из нее, с использованием действующих ГОСТов, СанПиН, ТР ТС / ЕАЭС и статистических методов для обеспечения качества и безопасности.
В ходе работы проведен анализ состояния популяции и уловов воблы в Волго-Каспийском регионе с учетом влияния антропогенных и иных факторов. Выполнен подробный системный обзор научной и научно-популярной литературы, а также нормативной документации в области обеспечения качества и безопасности продукции из воблы. Оценен вклад ветеринарно-санитарной экспертизы в обеспечение безопасности продукции из данной рыбы, в частности, по степени зараженности паразитами, в том числе опасными для человека, а также наличия нежелательных контаминантов. Проанализированы современные показатели качества и безопасности, в том числе результаты гистологических исследований, направленных на выявление опухолей различной этиологии у рыбы. Определена перспективность использования генетической идентификации продукции из воблы с целью выявления возможной подмены видового состава.
Установлена необходимость проведения комплексных исследований воблы и продукции из нее для обеспечения требований ветеринарно-санитарной экспертизы и получения достоверных данных о ее пищевой и потребительской ценности.

Ключевые слова. Вобла, *Rutilus rutilus caspicus*, ветеринарно-санитарная экспертиза, продукция, качество, безопасность, фальсификация, генетика, гельминты, опухоли

Финансирование. Работа является инициативным научным исследованием на базе ГНЦ РФ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» и выполнялась в рамках подготовки материалов к диссертации.

Для цитирования: Сытова М. В., Терпугова Н. Ю., Мюге Н. С. Ветеринарно-санитарная экспертиза продукции из воблы (*Rutilus rutilus caspicus*). Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 856–873. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2610

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2610
https://elibrary.ru/GYNFWZ

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

Veterinary and Sanitary Assessment of Caspian Roach Products (*Rutilus rutilus caspicus*)

Marina V. Sytova*, Nadezhda Yu. Terpugova, Nikolai S. Mugue

All-Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russia

Received: 27.07.2025
Revised: 26.09.2025
Accepted: 07.10.2025

**e-mail: m_sitova@vniro.ru*

© M.V. Sytova, N.Yu. Terpugova, N.S. Mugue, 2025

Abstract.
The Caspian roach (*Rutilus rutilus caspicus*) is in a collapsed status as a fish resource. The lack of current data on its quality and safety requires comprehensive studies to assess the impact of anthropogenic, pathogenic, invasive, and other factors on its population. This assessment of Caspian roach products relied on the current veterinary and sanitary requirements that protect customers from pathogens and invasive diseases.
The research featured fresh and dried Caspian roach from the Volga-Caspian region. Collection, processing, and analysis involved standard methods for commercial fishery. The sensory, physicochemical, microbiological, parasitological, and species-specific (DNA barcoding) results were compared with the current state standards and technical regulations.
The study revealed the current status of the Caspian roach population in the Volga-Caspian region, based on the anthropogenic and other factors. It involved a review of scientific publications and regulatory documents on the quality and safety of Caspian roach products. The veterinary and sanitary inspection documents ensure the safety of roach products in terms of parasite infestation and chemical pollutants. The relevant quality and safety indicators include the histological studies aimed at identifying tumors of various etiologies in fish. Adulteration can be prevented by DNA identification.
Further studies of Rutilus rutilus caspicus and its products are needed to update the existing veterinary and sanitary requirements, as well as to obtain reliable data on the nutritional and consumer value of roach products.

Keywords. Caspian roach, *Rutilus rutilus caspicus*, veterinary and sanitary expertise, products, quality, safety, falsification, genetics, helminths, tumors

Funding. This initiative research was conducted on the premises of the All-Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, as part of dissertation work.

For citation: Sytova MV, Terpugova NYu, Mugue NS. Veterinary and Sanitary Assessment of Caspian Roach Products (*Rutilus rutilus caspicus*). Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):856–873. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2610

Введение

Вобла (*Rutilus rutilus caspicus* (Yakovlev, 1870)) – бентосоядная, полупроходная, стайная, нехищная рыба, обитающая в Каспийском море и низовьях впадающих в него рек. Согласно международной и национальной систематике, данный вид входит в род *Rutilus* Rafinesque, 1820 (род Плотва), семейства Cyprinidae Bonaparte, 1832 (семейство Карповые) (https://fishbase.de). Считается, что вобла номинально образует три популяции: северо-каспийскую, азербайджанскую (куринская) и туркменскую (юго-восточная). Она является эндемиком Каспийского моря и обитает преимущественно в мелководной прибрежной зоне и почти по всей акватории Северного Каспия.

На нерест идет в реки, при этом высоко не поднимается. Основной промысел каспийской воблы осуществляют в дельте Волги (Астраханская область) в весенний период [1–7].

В Волго-Каспийском регионе вобла всегда была массовым объектом промысла и пользовалась большой популярностью как в России, так и за рубежом. Однако за последние десятилетия, после зарегулирования реки Волга и изменения ее водности, а также значительной нагрузки незаконного, несообщаемого и нерегулируемого промысла, запасы воблы резко снизились, и поэтому современное состояние можно охарактеризовать как крайне депрессивное. Если в первой половине XX в. уловы достигали 250 тыс. т, то после гидростроительства – 15–20 тыс. т, а в начале XXI в. – около 1,5 тыс. т. Систематическое несоблюдение оптимальных рыбохозяйственных подпусков воды в весенний нерестовый период на р. Волга за последние десятилетия негативно сказалось на условиях нереста воблы и развитии ее молоди. По этой причине в 2024 г. на законодательном уровне, по рекомендациям рыбохозяйственной науки и в соответствии с приказом Минсельхоза России

от 18.03.2024 № 151, введен ряд ограничительных мер на добычу воблы для восстановления популяции, включающих запрет на вылов (за исключением разрешенного прилова), сокращение разрешенного периода вылова, ограничения в части любительского рыболовства и иное [2, 5, 6, 8–11]; в 2025 г. приняты еще более жесткие меры. В настоящее время вылов воблы регламентирован только для научно-исследовательских целей. Кроме того, в целях сохранения популяции правилами рыболовства для Волжско-Каспийского рыбохозяйственного бассейна ограничен минимальный промысловый размер длины рыбы – 17 см, менее которого добыча (вылов) запрещена (приказ Минсельхоза России от 13.10.2022 № 695).

Необходимо отметить, что в связи с резким снижением запасов воблы (с 55 тыс. т в 2001 г. до 22 тыс. т в 2024 г.) начал активно обсуждаться вопрос по разработке технологий ее искусственного воспроизводства в нерестово-выростных хозяйствах (НВХ) Волго-Каспийского региона с последующим апробированием ее разведения. Положительному опыту выращивания воблы в НВХ в 1948–1949 гг. посвящены работы ученых Г. С. Карзинкина, Н. И. Кожина, М. А. Летичевского, И. И. Кузнецовой и О. И. Тарковской. Катастрофическая ситуация с запасами воблы на современном этапе заставляет специалистов вернуться к этому направлению исследований. За рубежом проводятся эксперименты по выращиванию *R. rutilus caspicus* в аквакультуре. Изучено влияние голодания и кормления молоди на компенсаторный рост, защитное действие витамина С на пищеварительные ферменты, иммунный ответ и морфофункциональное состояние жабр воблы в условиях стресса, вызванного диазиноном, химический состав и количественные характеристики спермы и др. [12–14].

По данным проекта материалов общего допустимого улова («КаспНИРХ», Астрахань 2024), начиная с 2020 г., значительное снижение запасов воблы (более чем в 2 раза) вызвало сокращение промышленной добычи, и ее официальный вылов в 2023 г. составил около 780 т. При этом отмечается, что браконьерский, а также неучтенный любительский вылов, зачастую достигающий заготовительных масштабов, по экспертным оценкам значительно превышают промысловый вылов и составляют суммарно 2,0–2,5 тыс. т [5, 8, 15].

В последние годы из-за небольших объемов добычи и неизменного спроса населения, ассортимент продукции из воблы традиционен: вяленая и сушеная продукция в неразделанном и разделанном виде (в том числе снековая) [5].

Вобла и продукция из нее относятся к скоропортящимся продуктам, что требует оценки качества и безопасности, а также проведения ветеринарно-санитарной экспертизы. Непереработанная продукция из воблы (живая, охлажденная, мороженая) в соответствии с ТР ЕАЭС 040/2016 в обязательном порядке подлежит ветеринарно-санитарной экспертизе. При нарушении санитарно-гигиенических и ветеринарных правил возможна порча продукции, которая влечет имущественные потери, а также риск развития у людей заболеваний различной этиологии. Основные обязательные требования по показателям безопасности и качества пищевой рыбной продукции установлены в техническом регламенте Таможенного союза 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» и в техническом регламенте Евразийского экономического союза 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции», а также в стандартах различного уровня и иных технических документах по стандартизации. Накопление тяжелых металлов в тканях рыб является важным фактором для осуществления мониторинга состояния и безопасности водных экосистем. Токсичные элементы при попадании в организм водных биоресурсов при антропогенном воздействии из-за загрязнений окружающей среды, при превышении предельно допустимых концентраций, оказывают влияние не только на их биологическое состояние, но и приводят к потенциальным рискам для здоровья человека. Микробиологическая контаминация также влияет на обеспечение безопасности пищевой продукции [5, 16–19].

Ветеринарно-санитарная экспертиза – комплекс исследований продукции животного и растительного происхождения непромышленного изготовления на соответствие требованиям технических регламентов, ветеринарных и санитарных правил и норм в целях установления научно обоснованных показателей качества и безопасности в ветеринарном и санитарном отношении исследуемых продуктов при производстве, хранении, перевозке и утилизации [20, 21].

В Государственных докладах «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации», подготовленных Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучии человека (Роспотребнадзор) за 2023 и 2024 гг., указано, что качество и безопасность пищевой продукции остаются одними из ведущих факторов в формировании здоровья населения. Несоответствие проб пищевой продукции гигиеническим нормативам по микробиологическим показателям для рыбы, нерыбных объектов промысла и продукции из них составило: в 2024 г. – 4,28 % (в 2023 г. – 5,28 %, а в 2014 г. – 6,78 %); по физико-химическим показателям в 2024 г. – 3,25 % (в 2023 г. – 4,41 %, в 2014 г. – 15,84 %). Эти данные показывают положительную динамику повышения качества и безопасности рыбной продукции в связи с мерами, принимаемыми Роспотребнадзором.

Нарушения обязательных требований к безопасности пищевой продукции увеличивают риск возникновения инфекционных и паразитарных заболеваний, опасных для человека. В этой связи в России проводится большая работа по созданию профилактических и лечебных препаратов, а также по разработке эф-

фективных средств лабораторной диагностики и мониторинга возбудителей паразитарных заболеваний [22]. В рыбной отрасли в исследовании паразитарных болезней гидробионтов, ряд из которых может передаваться человеку, достигнуты существенные успехи: изучена морфология паразитов, разработаны препараты для лечения заболеваний, меры борьбы и профилактики, основанные на строгом выполнении ветеринарно-санитарных правил, применение которых дает положительные результаты на производстве [5, 23].

У пресноводных рыб встречается более 1200 видов гельминтов. Биогельминтозы, такие как описторхоз, дифиллоботриоз, эхинококкоз, анизакидоз и другие, наносят значительный ущерб здоровью населения. Самым распространенным гельминтозом, передающимся через зараженную пресноводную рыбу, является описторхоз. При этом в целом по стране специалистами Роспотребнадзора отмечена многолетняя тенденция к снижению данного заболевания [23–27].

Продукция из воблы, как и из многих других видов рыб, часто является предметом ассортиментной фальсификации: потребителю вместо воблы предлагается продукция из других, часто менее ценных и более массовых видов. Кроме того, иногда «воблой» называют любую вяленую рыбу, в том числе подлещика, густеру, тарань, плотву обыкновенную и др. Если рыба представлена целиком, то эксперт и сам покупатель могут отличить воблу от других карповых по внешнему виду. Однако, если продукция представлена в переработанном виде, провести ее видовую идентификацию (в частности, это касается вяленой снековой продукции – соломка, палочки, ломтики, брусочки и др.) по внешним признакам без привлечения молекулярно-генетических методов не представляется возможным.

Актуальность исследования обусловлена следующими факторами. Требования к безопасности пищевой рыбной продукции установлены на законодательном уровне с принятием технических регламентов «О безопасности пищевой продукции» и «О безопасности рыбы и рыбной продукции». Вобла и продукция из нее могут содержать различные биологические и химические контаминанты, представляющие угрозу как самому объекту исследований, так и здоровью потребителей. Анализ требований ветеринарно-санитарной экспертизы воблы и продукции из нее по установленным в 2021 г. правилам (приказ Минсельхоза России от 24.11.2021 г. № 793), а также результаты исследований физико-химических, биохимических и других показателей качества и безопасности были освещены в научных источниках крайне недостаточно. Информация содержится в основном в научно-популярных материалах [5]. Изучение степени зараженности воблы паразитами и различными микроорганизмами, а также методов обеззараживания продукции является крайне важным, поскольку степень инвазии оказывает влияние на репродуктивную способность и, соответственно, на запасы воблы. Кроме того, многие возбудители паразитарных заболеваний передаются человеку при употреблении зараженной продукции в пищу, а патогенные бактерии могут вызвать тяжелые инфекционные заболевания. В целом за последние 20 лет глубокого всестороннего изучения показателей качества и безопасности продукции из воблы в научных работах с учетом требований ветеринарно-санитарного контроля на должном уровне не проводилось.

Цель исследования – комплексная оценка влияния антропогенных, патогенных, инвазионных и иных факторов на состояние популяции воблы, качество и безопасность продукции из нее с учетом современных требований ветеринарно-санитарной экспертизы для предотвращения реализации некачественной и опасной продукции, защиты жизни и здоровья населения.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – образцы воблы свежей и вяленой Волго-Каспийского региона. Образцы воблы свежей (северо-каспийская популяция) заготовлены в 2017–2024 гг. в рамках экспедиционных работ, а также при вылове рыбы в научно-исследовательских и контрольных целях, и в ходе любительского рыболовства на реке Волга и Каспийском море. Образцы воблы вяленой промышленного изготовления (продукция неразделанная, упакованная под вакуумом) приобретены в торговой сети в 2023–2024 гг.

Сбор, обработка и анализ биологического материала проводились по общепринятой методике рыбохозяйственных исследований в части изучения промысловых популяций рыб [28].

Основными органолептическими свойствами пищевых рыбных продуктов являются: внешний вид, вкус, запах, консистенция, текстура, форма и цвет. Другие важные характеристики, связанные с качеством продукции, включают вид упаковки и соответствие маркировки установленным требованиям [29, 30].

Органолептическая оценка воблы свежей осуществлялась на соответствие требованиям ГОСТ 814-2019 «Рыба охлажденная. Технические условия» (в связи с отсутствием стандартов, устанавливающих требования на воблу-сырец), и воблы вяленой – ГОСТ 1551-93 «Рыба вяленая. Технические условия».

Отбор и подготовку проб для анализа осуществляли по общепринятым методикам. Определение физико-химических показателей и пищевой ценности проводили на базе ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (Москва, Россия) в соответствии с ГОСТ 7636-85 и ГОСТ 31339-2006.

Оценку качества воблы и продукции из нее по микробиологическим показателям безопасности осуществляли в соответствии с требованиями действующих нормативных документов (СанПиН 2.3.2.1078-01; МУК 4.2.2046-06; ТР ТС 021/2011; ТР ЕАЭС 040/2016). В мышцах рыб определяли количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорга-

низмов (КМАФАнМ) (ГОСТ 10444.15-94) и наличие индикаторных микроорганизмов: бактерий группы кишечной палочки (ГОСТ 31747-2012), S*taphylococcus aureus* (ГОСТ 31746-2012), бактерий рода *Salmonella* (ГОСТ 31659-2012) и *Listeria monocytogenes* и других видов *Listeria* (*Listeria* spp.) (ГОСТ 32031-2022). Отбор проб для микробиологических исследований проводился согласно ГОСТ 31339–2006.

Полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды определяли по МВИ.МН 2352-2005 «Методика одновременного определения остаточных количеств полихлорированных бифенилов и хлорорганических пестицидов в рыбе и рыбной продукции с помощью газожидкостной хроматографии».

Содержание токсичных элементов (свинец, мышьяк, кадмий, ртуть) определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной аргоновой плазмой на анализаторе PlasmaMS 300 (NCS Testing Technology Co., Ltd, Китай) в Центре биотической медицины. Метод ИСП-МС основан на комбинировании индуктивно связанной аргоновой плазмы в качестве источника ионов и квадрупольного масс-спектрометра в качестве детектора. Индуктивно связанная плазма возбуждает однозарядные ионы из атомов образца, далее они фокусируются оптической системой и разделяются в анализаторе масс-спектрометра по отношению массы к заряду и количественно регистрируются интенсивностью соударений.

Безопасность уровня накопления токсикантов в образцах оценивали на соответствие требованиям ТР ЕАЭС 040/2016 и СанПиН 2.3.2.1078-01.

Сбор и обработку материала, характеризующего качество и безопасность водных биоресурсов и продуктов их переработки по паразитологическим показателям, осуществляли весной в 2017–2021 гг. на рыбопромысловых участках дельты р. Волга и с 2022–2023 гг. на торговых площадках Астраханской области. Методом неполного гельминтологического исследования (МУК 3.2.3804-22) проанализировано 540 экземпляров.

Для гистологических исследований отбирали воблу, с характерными клиническими признаками, выловленную в промысловых зонах р. Волга. Препараты из мышечной ткани и новообразований из внутренних органов готовили согласно методическим рекомендациям [31].

Для определения видовой принадлежности продукции наиболее распространенным является метод ДНК-штрихкодирования – определение последовательности участка митохондриального гена цитохромоксидазы субъединицы I (COI) и сравнение полученной последовательности с базой данных BOLD (Barcode of Life Database) или базой данных Генбанк. Для амплификации участка гена COI используется Фолмеровский фрагмент гена COI [32]. Для исследования видовой принадлежности рыб наиболее часто используются универсальные «рыбные» праймеры для ДНК-штрихкодирования [33].

При проведении исследований также применяли статистический метод анализа, экспертной оценки, аналитический метод систематизации научной информации, а также использовали требования законодательных актов Российской Федерации, стандарты различных уровней, нормативные и статистические материалы федеральных органов исполнительной власти.

Статистический анализ проводился с использованием программного обеспечения StatSoft Statistica 10. Для сравнения средних значений между тремя и более группами применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Статистико-биологический анализ. Проведен анализ статистических данных по уловам карповых рыб (включая воблу) и выпуску сушено-вяленой продукции в Российской Федерации, в том числе в Каспийском бассейне, за 2018–2022 гг. Данные промышленного производства сушено-вяленой продукции из воблы оценивали экспертно (без учета продукции из воблы-сырца любительского и браконьерского вылова).

Анализ данных за 2018–2023 гг., с учетом статистических сведений ФГБНУ «Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии», показал:

– снижение уловов карповых видов рыб в России в 1,2 раза; по вобле, тарани, плотве (без разделения по видам) – в 2,3 раза;
– снижение уловов карповых видов рыб во внутренних водоемах, включая Каспийский бассейн – в 1,2 раза; по вобле, тарани, плотве (без разделения по видам) – в 2,4 раза;
– снижение уловов карповых видов рыб в Каспийском бассейне – в 1,6 раз;
– снижение уловов воблы, плотвы (без разделения по видам) в Каспийском бассейне – в 6,6 раз. При этом в море и в пресных водах снижение составило 1,3 и 7,1 раза соответственно.

Современная промысловая статистика, начиная с 2000 гг., не выделяет уловы воблы из общих данных по вылову воблы, тарани и плотвы [34].

В таблице 1 представлены сведения по промысловому запасу, общим допустимым уловам и промышленным уловам воблы (без учета любительского и браконьерского уловов) в Каспийском бассейне за 2019–2026 гг.

В 1930–1939 гг. уловы воблы в Северном Каспии достигали около 250 тыс. т, в конце 1970 гг. – около 19 тыс. т. Необходимо отметить, что в 30 гг. прошлого столетия соотношение вылова в море к вылову в реке составляло 53 к 47 %. Согласно литературным данным и экспертным оценкам, основная часть промыслового запаса воблы с начала 2000 гг. до 2023 г. (примерно до 76,0–80,0 %) традиционно добывалась в реке Волга и впадающих в нее реках, а ранее эта доля в отдельных

Таблица 1. Промысловый запас, объемы общих допустимых уловов и объемы уловов воблы в Каспийском бассейне в 2019–2026 гг.*

Table 1. Commercial stock, total allowable catches, and catch volumes of Caspian roach in the Caspian basin, 2019–2026*

Показатель	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025**	2026**
Промысловый запас, тыс. т	24,9	24,9	24,8	23,5	23,0	21,5	19,0	18,0
Общий допустимый улов, тыс. т, в т. ч.:	1,56	1,45	1,41	1,31	1,11	0,50	0,016	0,014
в Каспийском море	0,342	0,334	0,330	0,310	0,260	0,100	0,014	0,010
в р. Волга	1,218	1,116	1,080	1,000	0,850	0,400	0,002	0,004
Уловы промышленные, т, в т. ч.:	1454,0	1204,0	1280,0	1160,0	778,1	341,9	–	–
в море	294,0	271,0	264,0	254,0	200,5	44,3	–	–
в пресных водах	1160,0	933,0	1016,0	906,0	577,6	297,6	–	–

Примечание: * – сведения из статистических форм 1-П рыба (Росстат), проектов материалов общего допустимого улова («КаспНИРХ»), приказов Минсельхоза России по установлению общего допустимого улова в морских водах, в р. Волга и ее водотоках [34]; ** – общий допустимый улов воблы на 2025–2026 гг. определен только для научно-исследовательских целей.

Note: * – The information comes from official statistics, projects of total permissible catch, and orders of the Ministry of Agriculture of Russia [34]; ** – The total permissible catch of Caspian roach for 2025–2026 is determined only for research purposes.

случаях составляла около 90 %. При этом соотношение объемов вылова в весенний и осенний периоды составляет примерно 65 к 35 % соответственно [2, 35, 36].

Анализ данных за 2019–2026 гг., представленных в таблице 1, показал:

– промысловый запас воблы, с учетом прогноза на 2025–2026 гг., снизился в 1,4 раза;

– установленные с учетом предосторожного подхода объемы общих допустимых уловов воблы снизились более чем в 110 раз, в том числе в море – в 34,2 раза, в р. Волга – в 304,5 раза;

– промышленные уловы воблы в 2019–2024 гг. снизились в 4,3 раза, в том числе в море – 6,6 раза, в пресных водах – 3,4 раза.

Выпуск сушено-вяленой продукции из водных биоресурсов в целом по стране, согласно статистическим сведениям по рыбной промышленности России, подготовленным ФГБНУ «ВНИРО» за 2018–2023 гг., вырос на 9,2 %. В связи со значительным сокращением запасов воблы в Волго-Каспийском регионе производство сушено-вяленой продукции из этой рыбы в промышленных условиях снизилось в 1,6 раза.

Органолептическая оценка свежей воблы. По морфологическим признакам вобла имеет округлую форму, тело рыбы вытянутое, слегка сплющено, с выступающими боками и небольшой горбинкой на спинке; чешуя мелкая, серебристая, плотно прилегающая к телу; на боках имеются светло-серебристые пятна, иногда отдающие светло-золотистым отливом; голова сплюснутая и маленькая; рот низко посаженный, полунижний и маленький; плавники от светло-серого до темно-серого цвета с черной оторочкой по краям (к осени могут принимать слегка красноватый оттенок); спинной плавник длинный, заканчивается практически у хвостового створа (стебля); хвостовой плавник равно раздвоенный, в форме латинской буквы V; анальный плавник довольно длинный; радужки глаз чаще серебристого или оранжевого цвета, под зрачками отмечаются отчетливо просматривающиеся темные небольшие пятна [1, 37].

Методы органолептической оценки показателей качества рыбной продукции и установления соответствия их нормируемым требованиям, благодаря их простоте и оперативности, широко используются при оценке сырья и готовой продукции [29]. Проведение органолептической оценки при клиническом осмотре свежевыловленной воблы показало следующее. По показателям «внешний вид» и «наружные повреждения» установлено, что поверхность рыбы чистая без наружных повреждений, покрыта тонким слоем слизи; окраска естественная, свойственная данному виду; тело рыбы серебристо-серого цвета с металлическим отливом чешуи; чешуя блестящая, плотно прилегающая к телу; плавники (грудные, брюшные, анальный) серого цвета с темными краями; радужная оболочка глаз серебристо-серая без красно-оранжевой пигментации; жабры темно-красного цвета; наблюдалась незначительная сбитость чешуи без повреждения кожного покрова; кровоизлияний на поверхности кожи не обнаружено; по консистенции рыба плотная, свойственная данному виду; на разрезе мышечная ткань упругая; запах также свойственный свежей рыбе, без посторонних неприятных запахов. Следует отметить, что для пресноводных рыб допускается слегка илистый запах, однако при органолептической оценке свежей воблы, выловленной в р. Волга, в настоящем исследовании он не выявлен.

Анализ размерно-массового состава воблы. Данные размерно-весовых показателей воблы в рамках научного лова в 2017–2021 гг. в районах промысла Волго-Каспийского региона представлены в таблице 2.

Анализ особей воблы с 2017 по 2021 гг. показал снижение доли самок в промысловых уловах на 21,9 %, в то время как доля самцов увеличивалась.

Таблица 2. Размерно-весовые показатели воблы в районах промысла Волго-Каспийского региона

Table 2. Size and weight of Caspian roach in the Volga-Caspian region

Год лова (количество)	Промысловая длина, см	Общая масса, г	Масса без внутренних органов, г	Доля самок в уловах, %
2017[а] (n = 100)	20,9 ± 0,3[б–г] (17,0–28,0)	208,5 ± 9,0[б–д] (90,0–464,0)	167,1 ± 7,0[б–д] (75,0–406,0)	96,0[г, д]
2018[б] (n = 50)	18,7 ± 0,2[а, д] (16,0–26,0)	143,0 ± 7,6[а] (80,0–362,0)	117,7 ± 6,2[а] (68,0–292,0)	96,0[г, д]
2019[в] (n = 100)	19,2 ± 0,2[а, г] (15,0–27,0)	160,3 ± 5,1[а, г] (54,0–448,0)	129,6 ± 4,2[а, г] (46,0–362,0)	98,0[г, д]
2020[г] (n = 80)	18,4 ± 0,4[а, в, г] (16,0–28,0)	127,0 ± 6,0[а, в, д] (76,0–420,0)	105,0 ± 5,0[а, в, д] (52,0–348,0)	87,5[а–в, д]
2021[д] (n = 100)	20,0 ± 0,2[б, г] (15,5–26,0)	175,7 ± 7,2[а, г] (68,0–416,0)	143,3 ± 5,5[а, г] (56,0–336,0)	75,0[а–г]

Примечание: результаты представлены в виде M ± m (min–max); [а, б, в, г, д] – достоверность различий $p < 0,05$.

Note: M ± m (min–max); [а, б, в, г, д] – the differences are reliable at $p < 0.05$.

Таблица 3. Размерно-массовый состав воблы с учетом разделки в историческом аспекте

Table 3. Size and mass standards for Caspian roach during processing: Retrospective analysis

Показатель	Данные 1927–1939 гг. [35, 36, 38]	Данные 1970–1999 гг. [4]	Результаты исследований 2022–2024 гг.
Длина, см	18,5–20,4 (весна) 16,2–22,0 (осень)	18,6–19,8	13,8–16,6 (весна) 16,6–18,3 (осень)
Масса, г	154,0–295,0 (весна) 136,0–176,0 (осень)	150,0–160,0	122,6–138,1 (весна) 138,1–152,6 (осень)
Мясо, %	61,0	48,7	47,6–50,4
Голова, %	17,3	15,1	14,3–15,5
Кости и плавники, %		15,9	12,0–13,9
Кожа, %		4,3	4,4–5,1
Внутренности, %, в т. ч.:	8,4	13,4	12,2–17,2
икра	6,4	14,0–23,0 (весна) 9,2 / 5–10 (осень)	13,5–20,1 (весна) 6,1–8,3 (осень)
молоки	–	1,8	1,2–1,8
Плавательный пузырь, %	0,9	1,6	1,0–1,4
Чешуя, %	6,1	5,1	5,5–6,2
Всего отходов, %	39,0	51,3	49,6–52,4
Тушка, %	60,2	61,8	58,0–59,2

В 2022–2024 гг. были продолжены исследования размерно-массового состава воблы-сырца, выловленной рыбаками-любителями в р. Волга. Полученные данные составили: длина рыбы – 15,0–20,4 см (отмечались единичные особи длиной около 30–33 см); масса – 160–190 г (отмечались особи массой до 360–400 г); выход икры – 6,1–8,3 % (в осенний период) и 13,5–20,1 % (в весенний период); выход тушки – 58,7–59,2 % [5].

Данные размерно-массового состава воблы в сравнении с аналогичными показателями начала и конца XX в. представлены в таблице 3.

По справочным данным ФГБНУ «ВНИРО» относительная масса всех частей тела воблы, кроме гонад, довольно постоянна. Масса икры в 1970–1990 гг. изменялась в широких пределах в зависимости от стадии зрелости, сезона вылова и размеров рыбы. В весенний период масса икры составляла от 14–23 %, в осенний – 5–10 % от массы целой рыбы. Весной икринки крупнее (Ø 1,1–1,3 мм), осенью – мельче (не более 0,9 мм). Выход пробойной икры – в среднем 8,7 % от массы рыбы. Отмечено, что некоторые особи в эти годы достигали массы до 1,5 кг при длине 50 см [4].

За последние три года, как показал анализ любительского рыболовства (2022–2023 гг.) и научных уловов (2024 г.), размерно-массовый состав воблы варьировался в относительно широких пределах. При этом основную часть уловов составляли особи длиной 13–16 см и массой 122–138 г.

Особенности ветеринарно-санитарной экспертизы. Согласно действующему законодательству РФ ветеринарно-санитарной экспертизе подлежит непереработанная пищевая продукция животного проис-

хождения, включая непереработанную рыбную продукцию (ТР ТС 021/2011; ТР ЕАЭС 040/2016).

Ветеринарно-санитарная экспертиза непереработанной пищевой продукции животного происхождения проводится для установления: соответствия обязательным требованиям по безопасности на отдельные виды пищевой продукции; благополучия происхождения в ветеринарном отношении хозяйств (промышленных объектов) (ТР ТС 021/2011).

В целях реализации закона Российской Федерации от 14 мая 1993 г. № 4979-1 «О ветеринарии» приказом Минсельхоза России от 24.11.202 г. № 793 разработаны и утверждены Ветеринарные правила назначения и проведения ветеринарно-санитарной экспертизы рыбы, водных беспозвоночных и рыбной продукции из них, предназначенных для переработки и реализации (приказ Минсельхоза России от 24.11.2021 № 793).

Основной задачей ветеринарно-санитарной экспертизы является установление свойств продукции, характеризующих не только ее пищевую ценность, но и ее безвредность для здоровья человека, в части исключения в продукте бактериальных загрязнений, токсичных контаминантов, возбудителей инфекционных заболеваний, чужеродных веществ и патолого-анатомических изменений.

Исследования показателей качества и безопасности свежей воблы. К санитарно-гигиеническим критериям оценки свежей, охлажденной и мороженой рыбы в соответствии с установленными требованиями относятся: микробиологические показатели, токсичные элементы, нитрозамины, пестициды, полихлорированные бифенилы, радионуклиды, диоксины, паразитологические показатели и ряд других параметров (согласно с требованиями СанПиН 2.3.2.1078-01 и ТР ЕАЭС 040/2016).

Определение нормируемых микробиологических показателей позволяет установить степень бактериальной обсемененности мышечной ткани рыб.

В исследуемых пробах мышц половозрелых особей свежей воблы определяли комплекс микробиологических параметров. Результаты исследования мышечной ткани воблы представлены в таблице 4.

КМАФАнМ в мышечной ткани обследованных экземпляров воблы ниже предельно-допустимой нормы

Таблица 4. Показатели безопасности мышечной ткани свежей воблы

Table 4. Safety indicators of fresh Caspian roach muscle tissue

Параметры	Нормативный показатель, согласно ТР ЕАЭС 040/2016, СанПиН 2.3.2.1078-01	Полученные результаты
КМАФАнМ, КОЕ/г	не более 5×10^4	$1{,}5 \times 10^3 \pm 0{,}08$
Бактерии группы кишечной палочки (колиформы), г	не допускаются в массе продукции 0,01	н. о.
Бактерии рода *Salmonella*	0,01	н. о.
Staphylococcus aureus, г	не допускаются в массе продукции 0,01	н. о.
Listeria monocytogenes, г	25,00	н. о.
Пестициды		
ГХЦГ, мг/кг	не более 0,03 (пресноводная)	< 0,0002
	не более 0,2 (морская)	
ДДТ и его метаболиты, мг/кг	не более 0,3 (пресноводная)	–
	не более 0,2 (морская)	
2,4-D кислота, ее соли и эфиры	не допускается (пресноводная)	–
Полихлорированные бифенилы, мг/кг	не более 2,0	< 0,007
Нитрозамины, мг/кг	не более 0,003	–
Диоксины, мг/кг	не более 0,000004	–
Радионуклиды, Бк/кг: цезий-137 стронций -90	 не более 130 не более 100	–
Токсичные элементы		
Свинец, мг/кг	не более 1,0	0,155 ± 0,0186 0,315 [39]
Кадмий, мг/кг	не более 0,2	0,00478 ± 0,00955 0,104 [39]
Мышьяк, мг/кг	не более 1,0 (пресноводная)	0,0881 ± 0,0132 0,034 [39]
	не более 5,0 (морская)	
Ртуть, мг/кг	не более 0,3 (пресноводная нехищная)	0,0359 ± 0,00538 0,075 [39]
	не более 0,5 (морская)	

Примечание: н. о. – не обнаружено; «–» – не определяли.

Note: н. о. – not detected; "–" – not identified.

содержания бактерий в мышечной ткани охлажденной и мороженой рыбы. Санитарно-показательные бактерии группы кишечной палочки, условно-патогенные стафилококки, патогенные сальмонеллы и листерии в микрофлоре мышечной ткани воблы не выделены, что в совокупности с невысоким уровнем обсемененности исследованных образцов мышечной ткани указывало на удовлетворительное состояние свежевыловленной воблы и полное соответствие нормам, установленным СанПиН 2.3.2.1078-01.

Неуклонный рост антропогенного влияния на водные экосистемы, обусловленный глобальными экологическими проблемами, вызывает необходимость определения токсичных поллютантов в сырье водного происхождения, из-за возможного переноса контаминантов из среды обитания в живые организмы, их последующего накопления и попадания через пищу.

В гидробионтах, согласно санитарным и ветеринарным требованиям, устанавливаются нормы по содержанию не биогенных металлов, обладающих токсическим воздействием, таких как свинец, ртуть, кадмий и мышьяк. Результатами проведенных исследований свежей воблы (табл. 4) установлено, что концентрации в исследуемых образцах указанных тяжелых металлов не превышали допустимых уровней. Уровень содержания пестицидов и полихлорированных бифенилов, также являющихся токсичными веществами, значительно ниже нормы (0,6 и 0,35 % от ПДУ соответственно). При этом, по более ранним данным содержание тяжелых металлов в свежей вобле было на порядок выше тех, которые были получены в результате настоящего исследования, что свидетельствует о благоприятной современной обстановке в районах промысла данного объекта [39, 40].

Ряд показателей, установленных согласно требованиям ветсанэкспертизы, в рамках проводимых испытаний не определялся. Это связано с тем, что в водоемах Астраханской области, по данным опубликованных материалов Россельхознадзора по Ростовской, Волгоградской и Астраханской областям и Республики Калмыкии в многолетнем аспекте не установлены превышения содержания нормируемых контаминантов в вобле (свежей, охлажденной, мороженой).

Результаты физико-химических исследований образцов свежей воблы показали, что массовая доля белка варьировала в пределах 18,0–19,0 %, а жира – 2,0–2,8 %. Можно отметить высокое содержание влаги – 77,6–78,9 %.

Паразитологические исследования свежей воблы. Санитарно-эпидемиологическая экспертиза рыбы и продуктов переработки на наличие возбудителей паразитарных болезней проводилась в соответствии с санитарными правилами по проведению паразитологического контроля и установленными паразитологическими показателями безопасности.

В рыбе, ракообразных, моллюсках, земноводных, пресмыкающихся и продуктах их переработки не допускается наличие живых личинок паразитов, опасных для здоровья человека.

При обнаружении живых личинок гельминтов следует руководствоваться санитарными правилами по профилактике паразитарных болезней (МУК 3.2.3804-22).

Согласно ГОСТ 34884-2022 паразитарные поражения – наличие паразитов, скоплений паразитов или их остатков в пищевой рыбной продукции, имеющих внешний вид, цвет и размер, которые позволяют отличить их от мышечной ткани рыбы, водных беспозвоночных, водных млекопитающих и других водных животных при визуальном контроле и / или с использованием других методов контроля.

В целях профилактики паразитарных болезней Роспотребнадзором разработаны и утверждены методические указания для обеспечения безопасности по паразитологическим показателям (МУК 3.2.3804-22 «Методы санитарно-паразитологической экспертизы рыбы, моллюсков, ракообразных, земноводных, пресмыкающихся и продуктов их переработки»).

Необходимо отметить, что согласно данным Роспотребнадзора, за период с 2015–2023 г. в России, в частности в Астраханской области, случаи заражения апофаллезом, эустронгилидозом и анизакидозом среди населения не выявлены. Заболеваемость описторхозом в целом по стране снизилась с 15,1 до 9,7 % на 100 тыс. населения, а в Астраханской области – с 2,4 % до единичных случаев. Среди всех зарегистрированных случаев заболевания в Астраханской области 80 % приходилось на сельское население и 20 % – на городское. Инвазия населения трематодами семейства Opisthorchidae происходит преимущественно через потребление воблы и ряда других рыб семейства Карповых [26, 41].

В результате проведенного ежегодного паразитологического анализа в свежей вобле в 2018–2023 гг. авторами зарегистрированы 4 вида паразитов, обладающих эпидемиологическим потенциалом (табл. 5).

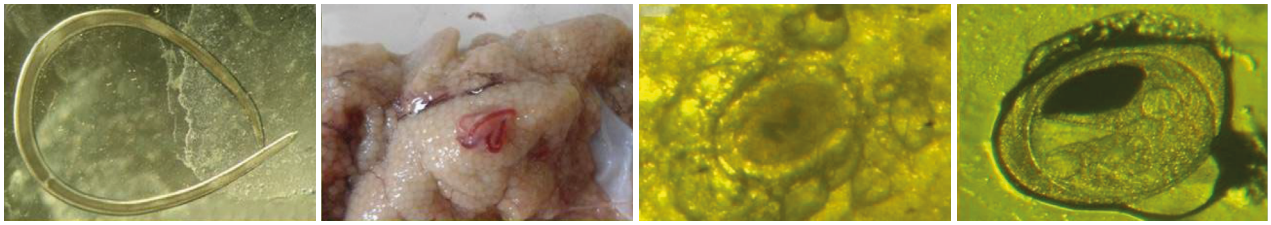
Класс нематод был представлен двумя видами: *Anisakis schupakovi* и *Eustrongylides excisus*. Личиночные формы этих паразитов выявлены на брыжейке, в полости тела, в полостном жире, а также во внутренних органах (рис. 1 a, b). В большинстве случаев все выявленные паразиты сохраняли жизнеспособность. Эти виды регулярно регистрируются, и их численность в период 2015–2017 гг. была выше среднего уровня по сравнению с остальными годами, что может быть связано с изменениями в экологических условиях или режимах хозяйственной деятельности в регионе. Примечательно, что данные нематоды не обнаружены в мышечной ткани, что соответствовало ветеринарно-санитарным нормам и позволило классифицировать рыбу как безопасную для потребления в пищу. Данное обстоятельство снижало риск для здоровья потребителей и указывало на локализованное присутствие паразитов.

В отличие от других гельминтов, обнаружение трематод, таких как *Apophallus muehlingi* и представителей

Таблица 5. Распространенность гельминтозных инвазий у воблы в Волго-Каспийском регионе в 2009–2023 гг., %

Table 5. Helminthic infestations in Caspian roach in the Volga-Caspian region in 2009–2023, %

Вид паразита	Данные 2009–2014 гг. [42]	Данные 2015–2017 гг. [43]	Результаты исследования 2018–2023 гг.
Anisakis schupakovi (Nematoda: Anisakidae)	1,3 ± 0,5	14,3 ± 1,4	6,0 ± 1,6
Eustrongylides excisus (Nematoda: Dioctophymidae)	3,0 ± 1,4	4,1 ± 1,5	6,9 ± 2,7
Apophallus muehlingi (Trematoda: Heterophyidae)	10,2 ± 0,2	11,6 ± 4,2	9,1 ± 2,6
Семейство Opisthorchidae *Opisthorchis felineus* и *Pseudamphistomum truncatum* (Trematoda: Opisthorchidae)	9,7 ± 2,5	2,2 ± 0,7	5,8 ± 1,6



a b c d

Рисунок 1. Гельминты воблы: a – нематода *Anisakis schupakovi*; b – нематода *Eustrongylides excisus* в икре; c – метацеркарии трематоды *Apophallus muehlingi* в мышечной ткани; d – метацеркарии трематоды семейства Opisthorchidae в мышечной ткани

Figure 1. Helminths in Caspian roach: a – nematode *Anisakis schupakovi*; b – nematode *Eustrongylides excisus* in fish eggs; c – metacercariae of trematode *Apophallus muehlingi* in muscle tissue; d – metacercariae of Opisthorchidae trematode in muscle tissue

семейства Opisthorchidae, в мышечной ткани воблы (рис. 1 c, d) имеет важное эпидемиологическое значение. В результате собственных исследований установлено, что уровень зараженности воблы этими паразитами значительно снизился, по сравнению с показателями, наблюдаемыми 15 лет назад.

Встречаемость неудовлетворительных проб по паразитарной зараженности свежевыловленной воблы за период наблюдения с 2015 г. по 2023 г. составляла в среднем 18,8 % в год.

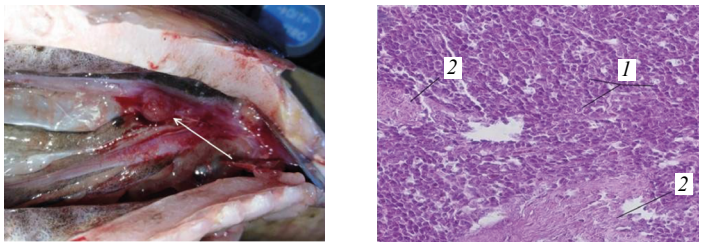
Таким образом, исследования уровня инвазии гельминтов у воблы свидетельствуют о характерных особенностях функционирования очага описторхоза в Волго-Каспийском регионе. Тенденция к снижению доли зараженных особей, по сравнению с данными 2009–2014 гг., может быть связана с изменениями природных условий (водность, температура, течение и т. д.), а также эффективностью внедренных мер по контролю паразитарных заболеваний в регионе. Все это требует принятия неукоснительных мер в соответствии с установленными способами по обеззараживанию сырья перед его использованием в пищу или направлением на последующую переработку.

Гистологические исследования. Результаты гистологических исследований внутренних органов воблы частично опубликованы в научных статьях [41–44]. Патологические изменения внутренних органов воблы отмечены в жабрах и гонадах. В частности, диагностированы базалиома и аденокистома. Базалиома встречалась спорадически и была обнаружена у 1,0 % обследованной воблы. Эта опухоль локализовалась на жаберном аппарате рыб, вызывая деформацию эпителия и нарушая функцию газообмена у пораженных особей. Новообразования были заключены в прозрачную капсулу, объединяющую несколько неоплазм, размеры которых варьировали от 0,5 до 2,5 см. Аденокистома (доброкачественная опухоль) также была выявлена у 1,0 % обследованной воблы с локализацией на гонадах и размерами от 0,5×1,0 см до 1,5×2,0 см.

Последующие исследования, проведенные в период с 2021 по 2024 гг., подтвердили наличие этих новообразований. Так, в 2021 г. аденокистома выявлена у 1,1 % особей (рис. 2).

Эти данные свидетельствуют о продолжающемся наличии неопластических изменений в популяции воблы. Аденокистома представлена кистозными образованиями, заполненными жидкостью и ограниченными капсулой. Несмотря на ее доброкачественную природу, опухоль может вызывать функциональные изменения в пораженных органах, влияя на репродуктивные способности рыбы.

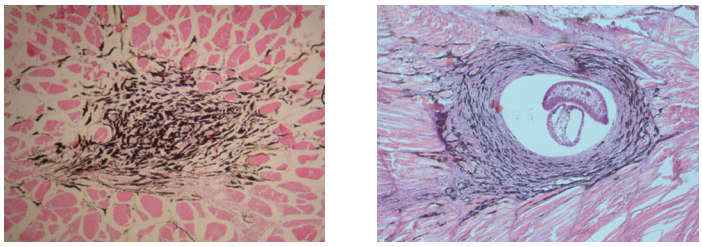
Анализу подвергнуты особи воблы с наличием черных точек на теле, вызываемых паразитом *Posthodiplostomum cuticola*. При гистологическом исследо-



a b

Рисунок 2. Новообразование на гонадах воблы: a – внешний вид; b – гистологический фрагмент (*1* – клетки опухоли, *2* – участок некроза). Окраска гематоксилин-эозин. Увеличение ×400

Figure 2. Neoplasm on Caspian roach gonads: a – appearance; b – histology (*1* – tumor cells; *2* – necrosis area), hematoxylin and eosin staining, magnification 400×



a b

Рисунок 3. Гистологический препарат мышечной ткани воблы: a – скопления черного пигмента (отсутствие паразита); b – инкапсулированная трематода *Posthodiplostomum cuticola*

Figure 3. Histology of Caspian roach muscle tissue: a – black pigment clusters (parasite-free); b – encapsulated trematode *Posthodiplostomum cuticola*

вании выявлено, что мышечная ткань была сильно отечной, со значительным варьированием диаметра мышечных волокон. В тканях регистрировались участки скопления черного пигмента, который являлся результатом паразитирования постдиплостомы. В местах скопления пигмента (то есть в местах обитания паразита) мышечные волокна оказались полностью разрушены. Обнаружены пути передвижения паразита в мышцах, характеризовавшиеся разрушением мышечных волокон и образованием так называемых «дорожек» (рис. 3).

Выявленные изменения негативно влияют на состояние рыбы и существенно снижают качество продукции. Рыба с такими поражениями имеет ухудшенную текстуру и внешний вид, что снижает ее потребительскую привлекательность. Более того, паразитарное воздействие может изменять питательный состав рыбы, влияя на содержание белков, жиров и других важных веществ.

С точки зрения авторов, экземпляры воблы, имеющие различные проявления опухолей (доброкачественные и злокачественные) и неопластические изменения, необходимо направлять на обязательное уничтожение, так как изучение влияния на здоровье и жизнь человека при потреблении пораженных особей не проводилось.

Ранее ветеринарные правила в отношении рыбной продукции из пресноводных и морских рыб (правила ветсанэкспертизы пресноводной рыбы и раков Главного управления ветеринарии Госагропрома СССР от 16.06.1988, приказ Минсельхоза России от 13.10.2008 № 462) устанавливали требования об отсутствии опухолей на теле свежей доброкачественной рыбы. При наличии явно выраженных новообразований рыба подлежала утилизации. В современных ветеринарных правилах в отношении водных биологических ресурсов (приказ Минсельхоза России от 24.11.2021 № 793) требования о недопустимости контаминации опухолевыми образованиями в рыбе, предназначенной на пищевые цели, отсутствуют. При этом необходимо отметить, что в ветеринарных правилах (приказ Минсельхоза России от 28.04.2022 № 269) при ветсанэкспертизе мяса и продуктов убоя (промысла) животных установлены жесткие требования в части недопустимости патологоанатомических изменений, в том числе новообразований, при наличии которых мясо и продукты убоя направляют на утилизацию.

Необходимо провести исследования, направленные на изучение возможного переноса атипичных клеток от рыб, имеющих злокачественные опухоли и неопластические изменения, к другим живым организмам при употреблении такой рыбы в пищу. Полученные результаты позволят внести соответствующие изменения в ветеринарные правила по проведению ветсанэкспертизы водных биоресурсов.

Органолептический анализ вяленой воблы. Согласно ГОСТ 34884-2022, вяление – один из способов консервирования рыбной продукции, при котором происходит процесс частичного обезвоживания пищевой рыбной продукции под воздействием воздуха при регулируемых или нерегулируемых параметрах влажности, температуры (не выше ~28 – 30 °С) и скорости движения воздуха до достижения массовой доли влаги в вяленой продукции не более 30 %. Продолжительность вяления воблы составляет от 10 до 20 суток.

Образцы вяленой воблы по органолептическим показателям (внешний вид, цвет, консистенция, вкус и запах) имели чистую сухую поверхность без наличия пятен и других видимых дефектов, с незначительной сбитостью чешуи без налета выкристаллизовавшейся соли на поверхности; наружные повреждения практически отсутствовали, встречались отдельные особи с незначительным лопанцем брюшка (не более 1 % от отобранных образцов), что допускается ГОСТ 1551-93; спинка вяленой воблы заостренная; цвет поверхности рыбы серебристо-серый; рыба обладала приятными рыбным запахом и вкусом, свойственными данной продукции без каких-либо посторонних и порочащих привкуса и запаха, плотной консистенцией и свойствами созревшего вяленого продукта; признаки окисления у образцов вяленой воблы (пожелтение на поверхности рыбы в районе плавников и брюшке, запах окислившегося жира) отсутствовали; мясо вяленой воблы плотное, упругое; консистенция не сухая, слегка увлажненная; при разделке вяленой рыбы мясо имело приятную блестящую маслянистую поверхность янтарно-коричневого цвета. Таким образом, установлена положительная органолептическая оценка исследуемых образцов вяленой воблы.

Необходимо отметить, что процесс «вяление» для получения «переработанной пищевой рыбной продукции» в ГОСТ 34884-2022 и ТР ЕАЭС 040/2016 как самостоятельный вид «переработки (обработки)» в данном термине не классифицирован. При этом термин «вяленая пищевая рыбная продукция» подразумевает изготовление путем вяления предварительно посоленной рыбы и других гидробионтов. Таким образом, вид продукции в указанных документах установлен, а процесс ее приготовления как вид переработки (обработки) отсутствует. С точки зрения авторов, необходимо внесение соответствующих изменений в ГОСТ 34884-2022 и ТР ЕАЭС 040/2016.

Исследования показателей качества и безопасности вяленой воблы. Вяленая вобла, относящаяся согласно ТР ЕАЭС 040/2026 к переработанной продукции, по требованиям к качеству и безопасности регулируется СанПиН 2.3.2.1078-01, ТР ЕАЭС 040/2026 и ГОСТ 1551-93. По требованиям ГОСТ 1551-93 в образцах вяленой воблы установлено содержание массовой доли влаги – не более 45 %, а содержание поваренной соли – от 6 до 15 %. При этом перерабатывающие предприятия могут регулировать данные показатели своими техническими условиями.

Проведены исследования физико-химического состава и показателей безопасности воблы, сравниваемых с нормативными требованиями (табл. 6).

В исследуемых образцах вяленой воблы массовая доля белка составила в среднем 38,5 %, жира – 6,5 %, влаги – 43,2 % и поваренной соли – 8,7 %.

Ранее, согласно «Информационным сведениям о пищевой ценности продуктов из гидробионтов» [45] химический состав воблы вяленой был определен в количестве: белки – 33,0 г/100 г продукта; жиры – 8,0 г/100 г продукта. Это согласовывалось с результатами проведенных авторами исследований. Можно отметить небольшой рост содержания белка (в 0,14 раза) и незначительное снижение содержания жира (в 0,19 раза).

Образцы по результатам проведенных испытаний по органолептическим, физико-химическим и микробиологическим показателям соответствовали требованиям ТР ЕАЭС 040/2016, СанПиН 2.3.2.1078-01, ГОСТ 1551-93.

Бактериальная контаминация воблы вяленой характеризовалась соответствием установленному для данного вида продукции нормативу КМАФАнМ. Санитарно-показательные бактерии группы кишечной палочки не выделены. Условно-патогенные сульфитредуцирующие клостридии, патогенные сальмонеллы, плесени и дрожжи также не выявлены.

Содержание тяжелых металлов, пестицидов, полихлорированных бифенилов, паразитологических показателей в вяленой вобле не превышал установленных нормативных пределов, что свидетельствовало о ее безопасности для употребления в пищу.

Молекулярно-генетическая идентификация продукции из воблы. Метод видовой ДНК-идентификации, являющийся наиболее распространенным для определения видовой принадлежности, позволяет однозначно идентифицировать продукцию из воблы от продукции из других рыбных родов, таких как лещ, густера, красноперка и др. Однако провести идентификацию продукции из видов рода Плотва (*Rutilus*) в пределах этого родового таксона невозможно. Ранее установлено, что митохондриальный геном у воблы и ряда каспийских и азово-черноморских видов этого рода, таких как кутум (*Rutilus frisii kutum*), вырезуб (*Rutilus frisii frisii),* тарань *(Rutilus heckelii)* и армянская плотва *(Rutilus schelkovnikovi)*, сходен между собой и не формирует видоспецифичных ветвей на филогенетическом дереве [46, 47]. В связи с этим, генетический анализ по митохондриальной ДНК не позволяет отличить продукцию воблы от продукции из обыкновенной плотвы, кутума и других видов рода *Rutilus*. Исследование, выполненное с применением полногеномного генотипирования методом ddRAD [48], продемонстрировало генетическую самостоятельность воблы как вида и выявило четкие различия в ядерном геноме воблы и других видов этого рода.

Таблица 6. Данные физико-химических, микробиологических исследований и показателей безопасности воблы вяленой

Table 6. Physicochemical, microbiological, and safety data on dried Caspian roach

Показатели	Нормативные значения	Полученные результаты
Физико-химические показатели согласно ГОСТ 1551-93		
Массовая доля влаги, %	не более 45	43,20 ± 1,11
Массовая доля жира, %	не нормируется	6,50 ± 0,13
Массовая доля белка, %	не нормируется	38,50 ± 0,42
Массовая доля углеводов, %	не нормируется	0
Содержание золы, г/100г продукта	не нормируется	9,73 ± 0,04
Массовая доля поваренной соли, %	от 6 до 15	8,70 ± 1,23
Микробиологические показатели согласно ТР ЕАЭС 040/2016, СанПиН 2.3.2.1078-01, МУК 3.2.3804-22		
КМАФАнМ, КОЕ/г	не более 5×10^4	$1,1 \times 10^3 \pm 0,06$
Бактерии группы кишечной палочки (колиформы), г	не допускаются в массе продукции 0,1	н. о.
Сульфитредуцирующие клостридии, г	не допускаются в массе продукции 1	н. о.
Сальмонеллы, г	не допускаются в массе продукции 25	н. о.
Плесень, КОЕ/г	не более 50	н. о.
Дрожжи, КОЕ/г	не более 100	н. о.
Показатели безопасности согласно ТР ЕАЭС 040/2016, СанПиН 2.3.2.1078-01		
Пестициды (ГХЦГ), мг/кг	не более 0,03	< 0,0002
Полихлорированные бифенилы, мг/кг	не более 2,0	< 0,007
Нитрозамины, мг/кг	не более 0,003	–
Диоксины, мг/кг	не более 0,000004	–
Радионуклиды (цезий-137), Бк/кг	не более 260	–
Свинец, мг/кг	не более 1,0	0,1010 ± 0,0121 0,416 [39]
Кадмий, мг/кг	не более 0,2	0,0816 ± 0,0122 0,072 [39]
Мышьяк, мг/кг	не более 1,0 (пресноводная)	0,6970 ± 0,0837 0,133 [39]
	не более 5,0 (морская)	
Ртуть, мг/кг	не более 0,3 (пресноводная нехищная)	0,233 ± 0,040 0,148 [39]
	не более 0,5 (морская)	
Паразитологические показатели для рыб семейства Карповых	Личинки в живом виде не допускаются	н. о.

Примечание: н. о. – не обнаружено; «–» – не определяли.

Note: н. о. – not detected; "–" – not identified.

На основе данных полногеномного анализа в дальнейшем целесообразно разработать тест-систему для идентификации продукции из воблы с целью исключения видовой подмены плотвой обыкновенной и другими карповыми рыбами.

Выводы

Проведенный анализ статистических данных по уловам воблы в Волго-Каспийском бассейне показал катастрофическое снижение за последнее десятилетие промыслового запаса в 1,4 раза, общих допустимых уловов – более чем в 110 раз и промышленных уловов – 4,4 раза. Выпуск сушено-вяленой продукции в промышленных условиях также сократился в 1,6 раза.

Органолептическая оценка свежей и вяленой воблы показала соответствие установленным нормативным требованиям. Анализ результатов современных исследований показал изменение ряда биологических показателей: за прошедшие 40 лет изменился размерно-массовый состав воблы, произошло уменьшение промысловой длины на 7,6–9,0 %, также снизились показатели массы вылавливаемых экземпляров на 5,6–7,9 %. Необходимо отметить поступательное снижение количества самок в уловах на 21,9 %, в то время как доля самцов увеличивалась.

Санитарно-микробиологические исследования образцов свежей воблы выявили низкие значения обсемененности, уровень которой значительно ниже установленного норматива. Отсутствие санитарно-значимых микроорганизмов позволило оценить гигиеническое состояние обследованных рыб как «удовлетворительное», что соответствовало санитарным нормам. Однако, по паразитологическим критериям качество воблы оценено как «условно годное» из-за наличия в органах и тканях живых личинок возбудителей гельминтозов (нематоды *Anisakis schupakovi*, *Eustrongylides excisus*,

трематоды *Apophallus muehlingi*, *Opisthorchis felineus*, *Pseudamphistomum truncatum*). Это означает, что рыба не может быть допущена к переработке в пищевую продукцию и реализации без предварительного обеззараживания. По результатам паразитологических исследований свежей воблы зарегистрированы 4 вида опасных для здоровья человека гельминтов с различной локализацией. Уровень зараженности трематодами значительно снизился, по сравнению с показателями, наблюдаемыми 15 лет назад. Встречаемость неудовлетворительных проб по паразитарной зараженности свежевыловленной воблы за период наблюдения с 2015 г. по 2023 г. составляла в среднем 18,8 % в год. Это требует обязательного обеззараживания сырья, направляемого на производство пищевой продукции, в соответствии с установленными мерами. В вяленой вобле живых личинок обнаружено не было, что свидетельствует о безопасности для употребления в пищу.

Исследуемые образцы вяленой воблы соответствовали требованиям ТР ЕАЭС 040,2016, СанПиН 2.3. 2.1078-01, ГОСТ 1551-93. На основании проведенного анализа нормативной документации в части вяленой рыбной продукции необходимо внесение в термин «переработка (обработка)» процесса «вяление» как самостоятельного вида в ГОСТ 34884-2022 и ТР ЕАЭС 040/2016.

Токсичные вещества (пестициды, полихлорированные бифенилы, свинец, кадмий, мышьяк, ртуть) в исследуемых образцах воблы свежей и вяленой находились в концентрациях значительно ниже предельно допустимых.

Гистологические исследования внутренних органов и мышечной ткани выявили структурные процессы (новообразования различной этиологии и неопластические изменения), которые требуют дальнейшего изучения для понимания их влияния на качество продукции и возможных рисков для здоровья потребителей. Необходимо проведение исследований по изучению возможного переноса атипичных клеток от рыб, имеющих злокачественные опухоли и неопластические изменения, другим живым организмам при употреблении рыбы с атипичными клетками, и внесение соответствующих изменений в ветеринарные правила по осуществлению ветсанэкспертизы водных биоресурсов.

Необходимо продолжить проведение генетических исследований с использованием методов видовой ДНК-идентификации, а также разработать тест-систему для предотвращения видовой фальсификации продукции из воблы.

Несмотря на снижение запасов воблы в Волго-Каспийском регионе, целесообразно продолжить начатые авторами комплексные научные исследования в рамках ветеринарно-санитарной экспертизы. Это позволит выявить проблемные вопросы, влияющие на восстановление численности воблы, а также получить достоверные данные о пищевой и потребительской ценности продукции из этого вида на современном этапе.

Критерии авторства

М. В. Сытова – разработка идеи и концепции статьи, анализ и интерпретация данных и материалов, подготовка статьи и выводов, окончательное редактирование статьи. Н. Ю. Терпугова – сбор материалов и литературных данных, обработка иллюстраций, подготовка статьи к публикации. Н. С. Мюге – анализ данных и материалов, подготовка статьи к публикации. 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

M.V. Sytova developed the research concept, analyzed the data, drafted the manuscript, and proofread the final version. N.Yu. Terpugova wrote the review, provided visualization, and proofread the article. N.S. Mugue analyzed the data and proofread the article. All the co-authors have agreed upon and approved the final version of the article and bear equal responsibility for its integrity, reliability, and 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. Гриценко О. Ф., Котляр А. Н., Котенев Б. Н. Промысловые рыбы России. Т. 1. М.: ВНИРО, 2006. 656 с. [Gritsenko OF, Kotlyar AN, Kotenev BN. Industrial fish of Russia. Vol. 1. Moscow: Russian Federal Research Institute Of Fisheries and Oceanography; 2006, 656 p. (In Russ.)]

2. Иванов В. П., Пальцев В. Н., Шипулин С. В. Рыбные ресурсы Каспийского моря. М.: ВНИРО, 2023. 560 с. [Ivanov VP, Paltingov VN, Shipulin SV. Fishing resources of the Caspian Sea. Moscow: Russian Federal Research Institute Of Fisheries and Oceanography; 2023, 560 p. (In Russ.)] https://elibrary.ru/MIJCTZ

3. Богуцкая И. Г., Кияшко П. В., Насека А. М., Орлова М. И. Определитель рыб и беспозвоночных Каспийского моря. Т. 1. Рыбы и моллюски. СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 543 с. [Bogutskaya NG, Kijashko PV, Naseka AM, Or1ova MI. Identification keys for fish and invertebrates. Volum 1. Fish and molluscs. Saint Petersburg: KMK Scientific Press Ltd.; 2013, 543 p. (In Russ.)]

4. Быков В. П. Справочник по химическому составу и технологическим свойствам рыб внутренних водоемов. М.: ВНИРО, 1999. С. 115–117. [Bykov VP. Handbook of the chemical composition and technological properties of inland water fish. Moscow: Russian Federal Research Institute Of Fisheries and Oceanography; 1999, pp. 115–117. (In Russ.)]

5. Терпугова Н. Ю., Сытова М. В. Вобла: продукция, качество, безопасность, паразитарная чистота. Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса. Экосистемы Голарктики в XXI веке: XII междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов. Москва, 2024. С. 137–139. [Terpugova NY, Sytova MV. The roach: Production, quality, safety, and parasites. Current problems and prospects for fisheries. Holarctic Ecosystems in the 21st century: XII International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists. Moscow, 2024:137–139. (In Russ.)] https://elibrary.ru/KEUCOQ

6. Кадимов Е. Л., Неваленный А. Н. Современная оценка факторов, определяющих эффективность воспроизводства рыб в низовьях р. Урал. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2024. № 4. С. 7–14. [Kadimov EL, Nevalennyy AN. Current assessment of factors determining fish reproduction efficiency in the lower reaches of the Ural river. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. 2024;2024(4): 7–14. (In Russ.)] https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-4-7-14

7. Гасанова А. Ш., Гусейнов К. М., Бархалов Р. М., Хлопкова М. В. К изучению биологии воблы *Rutilus rutilus caspicus* (Jakowlev, 1870) Крайновского прибрежья Каспийского моря. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 3. С. 93–97. [Gasanova AS, Guseynov KM, Barkhalov RM, Khlopkova MV. The study of the biology of the roach *Rutilus rutilus caspicus* (Jakowlev, 1870) in the Kraynovsky coast of the Caspian Sea. University news. North-Caucasian region. Natural sciences series. 2021;(3):93–97. (In Russ.)] https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-3-93-97

8. Барабанов В. В., Горохов М. Н., Шипулин С. В. О мерах по сохранению и восстановлению популяции воблы *Rutilus rutilus caspicus* (Jakovlev, 1870). Рыбное хозяйство. 2022. № 5. С. 77–81. [Barabanov VV, Gorokhov MN, Shipulin SV. On measures to preserve and restore the population of the roach *Rutilus rutilus caspicus* (Jakovlev, 1870). Fisheries. 2022;(5):77–81. (In Russ.)] https://doi.org/10.37663/0131-6184-2022-5-77-81

9. Барабанов В. В., Горохов М. Н., Зозуленко Ю. М., Харченко Н. Н., Шипулин С. В. Запасы и уловы воблы, и ее доступность населению Астраханской области. II междунар. науч.-техн. конф. Рыбохозяйственный комплекс России: 300 лет Российской академической науке. Москва, 2024. С. 53–57. [Barabanov VC, Gorokhov MN, Zozulenko YuM, Kharchenko NN, Shipulin SC. The roach: Stocks, catches, and availability in the Astrakhan Region. II International Scientific and Technical Conference of Russia's Fisheries Complex: 300 Years of Russian Academic Science. Moscow, 2024:53–57. (In Russ.)] https://elibrary.ru/MRIBIQ

10. 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

11. Сокольский А. Ф. К вопросу о запрете вылова воблы (*Rutilus rutilus caspicus*) в Волго-Каспийском рыбопромысловом районе. Рыбное хозяйство. 2024. № 5. С. 68–73. [Sokolsky AF. On the issue of banning the fishing of roach (*Rutilus rutilus caspicus*) in the Volga-Caspian fishing area. Fisheries. 2024;1(5):68–73. (In Russ.)] https://doi.org/10.36038/0131-6184-2024-5-68-73

12. Abolfath M, Hajimoradloo A, Ghorbani R, Zamani A. Compensatory growth in juvenile roach *Rutilus caspicus*: Effect of starvation and re-feeding on growth and digestive surface area. Journal of Fish Biology. 2012;81(6):1880–1890. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03407.x

13. Halimi M, Golpour A, Dadras H, Mohamadi M, Chamanara V. Quantitive characteristics and chemical composition in Caspian Roach (*Rutilus rutilus caspicus*) sperm. Iranian Journal of Fisheries Sciences. 2014;13(1):81–90.

14. Nikjoo M, Farhangi M, Patimar R, Adineh H, Alizadeh M. The protective effect of vitamin C on growth, digestive enzymes, immune response, and gill histology in Caspian roach (*Rutilus rutilus caspicus*) under diazinon stress. Aquaculture Reports. 2023;32:101698. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101698

15. Левашина Н. В., Ветлугина Т. А., Барабанов В. В., Белоголова Л. А. Состояние запасов воблы, судака, сазана, линя в Волго-Каспийском и Северо-Каспийском рыбохозяйственных подрайонах. Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2020. № 1. С. 8–15. [Levashina NV, Vetlugina TA, Barabanov VV, Belogolova LA. Status of stocks of roach, pike perch, carp, tench in the Volga-Caspian and North-Caspian fisheries subdistrict. Fish Breeding and Fisheries. 2020;(1):8–15. (In Russ.)] https://elibrary.ru/AUEYVZ

16. Sheikhzadeh H, Hamidian AH. Bioaccumulation of heavy metals in fish species of Iran: A review. Environmental Geochemistry and Health. 2021;43:3749–3869. https://doi.org/10.1007/s10653-021-00883-5

17. Khalkhal DG, Namin IJ, Sattari M. Concentration of heavy metals in different tissues (muscle, liver, gonad, skin, kidney) of Roach (*Rutilus rutilus caspicus*) in Guilan coasts of the Caspian Sea. Journal of Oceanography. 2022;13(51):77–90. https://doi.org/10.52547/joc.13.51.8

18. Stanković E, Krpo-Ćetković J, Rašković B, Poleksić V, Tasić A, *et al*. Comparison of potentially toxic elements (PTEs) and organochlorine pesticides (OCPs) levels in *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758) sampled from different reservoirs in terms of human health risk due to consumption. Environmental Geochemistry and Health. 2025;47:420. https://doi.org/10.1007/s10653-025-02729-w

19. Хишов А. С., Балагула Т. В., Лаврухина О. И., Третьяков А. В., Иванова О. Е. и др. Микробиологическая контаминация продовольственного сырья и готовой пищевой продукции (аналитический обзор). Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 486–503. [Khishov AS, Balagula TV, Lavrukhina OI, Tretyakov AV, Ivanova OE, Kozeicheva ES. Microbiological contamination of food raw materials and ready-to-eat foods: Analytical review. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):486–503. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2451

20. Борисов В. В. О ветеринарных сопроводительных документах и ветеринарно-санитарной экспертизе. Пищевая промышленность: бухгалтерский учет и налогообложение. 2010. № 5. С. 1–6. [Borisov V. V. On veterinary accompanying documents and veterinary and sanitary examination. Food industry: Accounting and taxation. 2010;(5):1–6. (In Russ.)]

21. Уша Б. В., Авылов Ч. К., Гламаздин И. Г., Кунаков А. А. Ветеринарно-санитарная экспертиза. М.: ИНФРА-М, 2024. 252 с. [Usha BV, Avylov CK, Glamazdin IG, Kunakov AA. Veterinary and Sanitary Examination. Moscow: INFRA-M; 2024, 252 p. (In Russ.)] https://doi.org/10.12737/1025981

22. Василевич Ф. И., Бачинская В. М., Гончар Д. В. Ветеринарно-санитарная оценка продуктов животноводства при паразитарных зоонозах. Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2023. № 1. С. 55–60. [Vasilevich FI, Bachinskaya VM, Gonchar DV. Veterinary and sanitary evaluation of livestock products in parasitic zoonoses. Russian Journal Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology. 2023;(1):55–60. (In Russ.)] https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202301008

23. Васильков Г. В. Паразитарные болезни рыб и санитарная оценка рыбной продукции. М.: ВНИРО, 1999. 191 с. [Vasilkov GV. Parasitic diseases in fish and sanitary assessment of fish products. Moscow: Russian Federal Research Institute Of Fisheries and Oceanography; 1999, 191 p. (In Russ.)]

24. Ларцева Л. В., Обухова О. В. Биологические опасности, связанные с паразитами рыб. Естественные науки: актуальные вопросы и социальные вызовы: материалы IV междунар. науч.-техн. конф. Астрахань, 2021. С. 18–25. [Lartseva LV, Obukhova OV. Biological hazards associated with fish parasites. Natural Sciences: Current Issues and Social Challenges: Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference, Astrakhan, 2021:18–25. (In Russ.)] https://elibrary.ru/EMNFZC

25. Abdybekova AM, Abdibayeva AA, Popov NN, Zhaksylykova AA, Barbol BI, *et al*. Helminth parasites of fish of the Kazakhstan sector of the Caspian Sea and associated drainage basin. Helminthologia. 2020;57(3):241–251. https://doi.org/10.2478/helm-2020-0030

26. Катаева Д. Г., Омаров А. Н., Даудов Д. А. Ветеринарно-санитарная экспертиза рыбы при инвазионных болезнях. Современные проблемы и перспективы развития рыбного хозяйства и аквакультуры в регионах: материалы всерос. (нац.) науч.-практ. конф. с международным участием. Махачкала, 2023. С. 314–321. [Kataeva DG, Omarov AN, Daudov DA. Veterinary and sanitary examination of fish in invasive diseases. Veterinary and sanitary examination of fish in invasive diseases D.G. Current problems and prospects for the development of fisheries and aquaculture in Russia's regions: Proceedings of the All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation. Makhachkala, 2023:314–321. (In Russ.)] https://elibrary.ru/THOGIQ

27. Хасбулатова З. А., Давудова Э. З., Гацайниева Х. А., Магомедова С. М. Показатели зараженности воблы (*Rutilus rutilus caspicus*) постодимлостомозом в Аграханском заливе Каспийского моря. Проблемы развития АПК региона. 2022. № 4. С. 180–185. [Khasbulatova ZA, Davudova EZ, Gatsainieva HA, Magomedova SM. Infection indicators of the vobla (*Rutilus rutilus caspicus*) with postodymlostomiasium in the Agrakhan bay of the Caspian sea. Development Problems of Regional Agro-Industrial Complex. 2022;(4):180–185. (In Russ.)] https://doi.org/10.52671/20790996_2022_4_180

28. Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая промышленность, 1966. 376 с. [Pravdin IF. A Guide to fish studies. Moscow: Food Industry; 1966. 376 p. (In Russ.)]

29. Сытова М. В. Методические подходы к оценке качества пищевой рыбной продукции с использованием сенсорного анализа: научный обзор. Труды ВНИРО. 2023. Т. 191. С. 124–141. [Sytova MV. Methodological approaches to assessing the quality of fish food products using sensory analysis: Scientific review. Trudy VNIRO. 2023;191:124–141. (In Russ.)] https://doi.org/10.36038/2307-3497-2023-191-124-141

30. Есина Л. М., Горбенко Л. А. Актуализация документов по стандартизации на рыбу провесную для обеспечения требований ТР ЕАЭС 040/2016. Водные биоресурсы и среда обитания. 2020. Т. 3. № 4. С. 89–102. [Esina LM, Gorbenko LA. Revision of standardization documents on air-dried fish to ensure their compliance with the requirements of TR EAEU 040/2016. Aquatic Bioresources & Environment. 2020:3(4):89–102. (In Russ.)] https://doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_4_89

31. Терпугова Н. Ю., Грушко М. П. Методические рекомендации по гистологическому исследованию новообразований у промысловых видов рыб при ветеринарно-санитарной оценке. М.: ВНИРО, 2025. 40 с. [Terpugova NY, Grushko MP. Guidelines for histological examination of neoplasms in commercial fish species during veterinary and sanitary assessment. Moscow: Russian Federal Research Institute Of Fisheries and Oceanography; 2025, 40 p. (In Russ.)]

32. Folmer O, Black M, Hoeh W, Lutz R, Vrijenhoek R. DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates. Molecular Marine Biology and Biotechnology, 1994; 3(5):294–299.

33. Ivanova NV, Zemlak TS, Hanner RH, Herert PDN. Universal primer cocktails for fish DNA barcoding. Molecular Ecology Notes. 2007;7(4):544–548. https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2007.01748.x

34. Сытова М. В., Терпугова Н. Ю., Камшуков С. В. Результаты биолого-статистического анализа по уловам, выпуску продукции из карповых рыб, в том числе из воблы Волжско-Каспийского региона на современном этапе. Рыбохозяйственная наука в XXI в.: ключевые направления развития. Материалы III междунар. науч.-практ. конф. и V школа молодых ученых и специалистов. Москва, 2025. С. 789–794. [Sytova MV, Terpugova NYu, Kamshukov SV. The results of a biological and statistical analysis of catches and production of cyprinid fish, including roach from the Volga-Caspian region at the present stage. Fisheries science in the 21st century: Key areas of development. Materials of the III International Scientific and Practical Conference and the V School of young scientists and specialists. Moscow, 2025:789–794. (In Russ.)] https://elibrary.ru/RZHSTV

35. Елисеев Д. С. Технология консервирования рыбы и других водных промысловых. М.: Снабтехиздат, 1934. 228 с. [Eliseev DS. Technology of fish canning and other aquatic commercial foods. Moscow: Snubtechnizdat; 1934. 228 p. (In Russ.)]

36. Дементьева Т. Ф. Распределение и миграция воблы в море. Вобла Северного Каспия. Труды ВНИРО. М.: Пищепромиздат, 1939. С 81–128. [Dementieva TF. Distribution and migration of Caspian roach in the sea. Northern Caspian roach. Proceedings of All-Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography. Moscow: Pishchepromizdat; 1934, 81–128 pp. (In Russ.)]

37. Барабанов В. В. Вобла – 150 лет исследований: прошлое, настоящее и будущее. Астрахань: КаспНИРХ, 2019. 114 с. [Barabanov VV. Roach – 150 years of research: Past, present and future. Astrakhan: KaspNIRKh; 2019, 114 p. (In Russ.)] https://elibrary.ru/KLHAFL

38. Монастырский Г. Н. Нерестовый ход в реки, размножение и скат воблы. Вобла Северного Каспия. Часть II. Труды Всесоюзного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. Том 11. М.: Пищепромиздат, 1940. С. 25–48. [Monastyrsky GN. River roach: Spawning, reproduction, and migration. The Northern Caspian roach. Part II. Proceedings of the All-Union Research Institute of Fisheries and Oceanography. Volume 11. Moscow: Pishchepromizdat; 1940, pp. 25–48. (In Russ.)]

39. Ким И. Н., Кращенко В. В., Кушнирук А. А. Безопасность продовольственного сырья и продуктов питания. Морепродукты. Часть 2. М.: Юрайт, 2020. 208 с. [Kim IN, Kraschenko VV, Kushniruk AA. Safety of food raw materials and food products. Seafood. Part 2. Moscow: Urite; 2020, 208 p. (In Russ.)]

40. Крючков В. Н., Мельник И. В., Поцелуева Е. В. Сезонные изменения кумуляции углеводородов в вобле дельты Волги. Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 3. С. 57–63. [Kryuchkov VN, Melnik IV, Potselueva EV. Seasonal changes in hydrocarbons accumulation of the Volga Delta roach. Oil and gas technologies and environmental safety. 2023;(3):57–63. (In Russ.)] https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-3-57-63

41. Терпугова Н. Ю., Грушко М. П., Федорова Н. Н. Постодиплостомоз ранней молоди воблы. Ветеринария. 2022. № 3. С. 45–50. [Terpugova NYu, Grushko MP, Fedorova NN. Post-hodiplostomosis of early youth vobla. Veterinary Medicine. 2022;(3):45–50. (In Russ.)] https://doi.org/10.30896/0042-4846.2022.25.3.45-49

42. Володина В. В., Грушко М. П., Федорова Н. Н., Воронина Е. А., Терпугова Н. Ю. и др. Морфологическая характеристика и экологическое значение опухолей рыб Волго-Каспийского бассейна. Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15. № 2. С. 48–60. [Volodina VV, Grushko MP, Fedorova NN, Voronina EA, Terpugova NYu., *et al*. Morphological characteristics and ecological significance of Volga-Caspian Basin fish tumors. South of Russia: Ecology, development. 2020; 15(2):48–60. (In Russ.)] https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-2-48-60

43. Конькова А. В., Володина В. В., Воронина Е. А., Терпугова Н. Ю. Эпидемиологическое значение паразитов рыб Волго-Каспийского рыбохозяйственного подрайона (Астраханская область). Гигиена и санитария. 2020. Т. 99. № 5. С. 448–454. [Konkova AV, Volodina VV, Voronina EA, Terpugova NYu. The epidemiological significance of parasites of fishes in the Volga-Caspian fishery subdistrict (Astrakhan region). Hygiene and Sanitation. 2020;99(5):448–454. (In Russ.)] https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-5-448-454

44. Уразова М. Т. Опухоли у некоторых волжских рыб. Современное экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты рационального природопользования: II междунар. науч.-практ. интернет-конф. Соленое Займище, 2017. С. 1404–1407. [Urazova MT. Tumors in Volga fish. Current ecological status of the natural environment and scientific and practical aspects of sustainable nature management: II International Scientific and Practical Internet Conference. Solenoe Zaimishche, 2017:1404–1407. (In Russ.)] https://elibrary.ru/ZANQGJ

45. Информационные сведения о пищевой ценности продуктов из гидробионтов. Качество, безопасность и методы анализа продуктов из гидробионтов. М.: ВНИРО, 2003. 96 с. [Nutritional information for aquatic products. Quality, safety, and analysis methods for aquatic products. Moscow: Russian Federal Research Institute Of Fisheries and Oceanography; 2003, 96 p.]

46. Levin BA, Simonov EP, Ermakov OA, Levina MA, Interesova EA, *et al*. Phylogeny and phylogeography of the roaches, genus *Rutilus* (Cyprinidae), at the Eastern part of its range as inferred from mtDNA analysis. Hydrobiologia. 2017; 788(1):33–46. https://doi.org/10.1007/s10750-016-2984-3

47. Макарова Е. Г., Козлова Н. В., Барегамян М. А. Полиморфизм генов цитохромоксидазы и цитохрома Б митохондриальной ДНК рыб семейства карповые (Cyprinidae) Волжско-Каспийского рыбохозяйственного бассейна. Каспий: прошлое, будущее, настоящее. 2021. С. 49–52. [Makarova EG, Kozlova NV, Baregamyan MA. Polymorphism of cytochrome oxidase and cytochrome B Ofmitochondrial DNA fishes of the cyprinids family (Cyprinidae) of the Volga-Caspian fishery basin. 2021:49–52.] https://elibrary.ru/FUFUUI

48. Pourshabanan A, Yazdani Moghaddam F, Mousavi-Sabet H, Ghassemzadeh F, *et al*. Molecular phylogeny and taxonomy of roaches (Rutilus, Leuciscidae) in the southern part of the Caspian Sea. Caspian Journal of Internal Medicine. 2022;(Jan):1–12.

Дополнительная информация об авторах / Information about the authors

Сытова Марина Владимировна / Marina V. Sytova ORCID 0000-0002-4798-0136; eLIBRARY SPIN 1439-0116
Терпугова Надежда Юрьевна / Nadezhda Yu. Terpugova ORCID 0000-0003-3403-0075; eLIBRARY SPIN 5485-9250
Мюге Николай Сергеевич / Nikolai S. Mugue ORCID 0000-0001-8957-1931; eLIBRARY SPIN 1916-2289

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2614
https://elibrary.ru/KYSSGL

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Изучение воздействия растительных метаболитов на *Aliivibrio fischeri* и тест-штаммы представителей микробиоты ЖКТ

В. М. Ле*, А. Д. Веснина, А. Ю. Просеков, В. Ф. Долганюк, Т. А. Ларичев, В. П. Юстратов

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 16.09.2025
Принята после рецензирования: 06.11.2025
Принята к публикации: 11.11.2025

**e-mail: ya808@yandex.ru*
© В. М. Ле, А. Д. Веснина, А. Ю. Просеков, В. Ф. Долганюк, Т. А. Ларичев, В. П. Юстратов, 2025

Аннотация.
В связи с широким применением растительных метаболитов в народной медицине, фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности, актуально изучение их токсичности с целью оценки безопасности для человека. Исследования *in vivo* большого количества образцов на токсичность с использованием животных в качестве тест-организмов являются дорогостоящими, так как требуют значительных материальных и временных ресурсов, а также одобрения этического комитета. В связи с этим востребованы альтернативные методы оценки токсичности объектов исследования, позволяющие сократить количество образцов, которые в дальнейшем будут подвергаться более углубленному изучению (например, на грызунах). Одним из альтернативных подходов оценки токсичности является использование модельных тест-организмов *in vitro*, например микроорганизмов. Целью данной работы являлась оценка токсичности ряда растительных метаболитов *in vitro*, с использованием биолюминесцентных бактерий *Aliivibrio fischeri*, и их влияния на ряд представителей микробиоты ЖКТ.
Объектами исследования послужили растительные метаболиты: рутин, розмариновая и транс-коричная кислоты, кверцетин, кемпферол, байкалин и вогонин. Их степень чистоты составляла более 94 %. Данные метаболиты выделены в ходе ранее проведенных исследований из каллусных, суспензионных и корневых культур растений Сибирского федерального округа. Токсичность этих соединений определялась с помощью биолюминесцентных бактерий (*A. fischeri*): оценивалось влияние веществ на интенсивность свечения этих микроорганизмов. Анализ проводился с помощью тонкослойной хроматографии. Дополнительно оценивалось влияние исследованных растительных метаболитов на тест-штаммы: *Propionibacterium jensenii* (В-6085), *Propionibacterium freudenreichii* (В-11921), *Lactobacillus freudenreichii* subsp. *freudenreichii* (В-6561), *Lactiplantibacillus plantarum* (В-884), *Bifidobacterium longum* (АС-1257), *Bifidobacterium bifidum* (АС-1779).
Установлено, что растворы рутина, кверцетина, вогонина и байкалина в 20 % этаноле проявляли токсичность по отношению к *A. fischeri*. Среди рассматриваемых объектов исследования только кемпферол стимулировал прирост биомассы лакто- и бифидобактерий. Кверцетин, рутин и транс-коричная кислота подавляли рост биомассы пропионовокислых бактерий. Остальные вещества подавляли негативное влияние 20 % этанола, не влияя на рост тест-штаммов.
Результаты проведенного исследования подтвердили целесообразность предварительной оценки токсичности растительных объектов с помощью биолюминесцентных бактерий *A. fischeri* как промежуточного этапа перед *in vivo* исследованиями.

Ключевые слова. Растительные метаболиты, биологически активные вещества, биолюминесценция, токсичность, *Aliivibrio fischeri*, микробиота

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).

Для цитирования: Ле В. М., Веснина А. Д., Просеков А. Ю., Долганюк В. Ф., Ларичев Т. А. и др. Изучение воздействия растительных метаболитов на *Aliivibrio fischeri* и тест-штаммы представителей микробиоты ЖКТ. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 874–884. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2614

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2614
https://elibrary.ru/KYSSGL

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

Effects of Plant Metabolites on *Aliivibrio fischeri* and Test Strains of Gastrointestinal Microbiota

Violeta M. Le*, Anna D. Vesnina, Alexander Yu. Prosekov, Vyacheslav F. Dolganyuk, Timothy A. Larichev, Vladimir P. Yustratov

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: 16.09.2025
Revised: 06.11.2025
Accepted: 11.11.2025

**e-mail: ya808@yandex.ru*

© V.M. Le, A.D. Vesnina, A.Yu. Prosekov, V.F. Dolganyuk, T.A. Larichev, V.P. Yustratov, 2025

Abstract.
Plant metabolites undergo a thorough toxicity test before becoming part of pharmaceuticals or functional food products. *In vivo* toxicity studies on animals are expensive and time-consuming. Moreover, they require an ethic approval and a lot of expendables. Alternative methods often involve microbial models. As a result, they reduce the number of animal test subjects on further research stages. This study tested the toxicity of several plant metabolites *in vitro* on *Aliivibrio fischeri* and gastrointestinal microbiota.
The research included rutin, rosmarinic acid, trans-cinnamic acid, quercetin, kaempferol, baicalin, and wogonin (≥ 94%). These plant metabolites were isolated from callus, suspension, and root cultures of Siberian plants. Their toxic effects were tested on the bioluminescent properties of *Aliivibrio fischeri*. The analysis relied on the method of thin-layer chromatography. Another experiment assessed the toxic effects of these plant metabolites on *Propionibacterium jensenii* (B-6085), *Propionibacterium freudenreichii* (B-11921), *Lactobacillus freudenreichii subsp. freudenreichii* (B-6561), *Lactobacillus plantarum* (B-884), *Bifidobacterium longum* (AC-1257), and *Bifidobacterium bifidum* (AC-1779).
The solutions of rutin, quercetin, wogonin, and baicalin (20% ethanol) were toxic towards *A. fischeri*. Kaempferol was the only metabolite that stimulated the biomass growth of lacto- and bifidobacteria. Quercetin, rutin, and trans-cinnamic acid inhibited the biomass growth of propionic bacteria. The other metabolites suppressed the negative impact of 20% ethanol without affecting the growth of the test strains.
A. fischeri tests proved to be a reliable preliminary toxicity assessment of plant materials before *in-vivo* studies.

Keywords. Plant metabolites, biologically active substances, bioluminescence, toxicity, *Aliivibrio fischeri*, microbiota

Funding. The work was carried out by the state task on the topic “Development of biologically active additives consisting of metabolites of plant objects in vitro to protect the population from premature aging” (project FZSR-2024-0008).

For citation: Le VM, Vesnina AD, Prosekov AYu, Dolganyuk VF, Larichev TA, *et al.* Effects of Plant Metabolites on *Aliivibrio fischeri* and Test Strains of Gastrointestinal Microbiota. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):874–884. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2614

Введение

Растительные метаболиты, благодаря своему биопотенциалу (антиоксидантные, антимикробные, противовоспалительные, ранозаживляющие и другие свойства), широко используются в различных отраслях промышленности – фармацевтической, пищевой, косметической и т. д. [1–5]. Перспективно их применение для профилактики развития и лечения ряда хронических заболеваний. Среди растительных метаболитов выделяют флавонолы, такие как рутин, розмариновая и транс-коричная кислоты, кверцетин, кемпферол, байкалин и вогонин. Эти соединения содержатся во фруктах, овощах, кофе, чае, вине, злаках и прочих растениях. Данные метаболиты широко распространены среди потребителей (активно используются в народной медицине). Флавоны и их метаболиты оказывают локальное воздействие на сосудистую функцию и антитромбоцитарное действие, что способствует снижению риска тромботических сердечно-сосудистых заболеваний [6]. Доклинические исследования на животных показали, что флавонолы улучшают гликемический контроль и чувствительность к инсулину [7]. В клинических испытаниях на людях с ожирением отмечено снижение индекса массы тела и других биомаркеров, связанных с ожирением, после систематического приема флавонойдов [7, 8].

Полифенолы известны своими антиоксидантными свойствами и пользой для здоровья. Однако в научной литературе появляется все больше доказательств того, что при определенных условиях они могут оказывать

и нежелательное воздействие на организм потребителя. Потенциальные негативные последствия могут быть связаны с влиянием растительных антиоксидантов на усвоение питательных веществ, процессы пищеварения, метаболизм лекарств, гормональную активность и даже стабильность генома [9]. Например, флавоноиды могут связываться с пищевыми белками и пищеварительными ферментами, изменяя их структуру, растворимость и активность [10]. Полифенолы могут влиять на фармакокинетику лекарственных средств, модулируя активность ферментов цитохрома P450 и переносчиков лекарственных средств, таких как P-гликопротеин [11]. Изофлавоны, подкласс полифенолов, структурно схожих с эстрогенами, могут оказывать как эстрогенное, так и антиэстрогенное действие в зависимости от типа ткани и гормонального фона [12]. При определенных условиях, таких как высокая локальная концентрация переходных металлов (железо, медь), щелочной pH и наличие кислорода, полифенолы могут действовать как прооксиданты [13]. В результате их активности могут образовываться активные формы кислорода, что приводит к перекисному окислению липидов, модификации белков и повреждению ДНК [14, 15]. Модели *in vitro* и *in vivo* показали, что пренатальное воздействие высоких доз некоторых флавоноидов приводит к увеличению частоты хромосомных перестроек, в частности и в генах, связанных с некоторыми видами рака [16]. Потенциальные побочные эффекты полифенолов зависят от контекста, дозы, формы (чистое соединение или цельный продукт), индивидуального физиологического состояния и сопутствующих факторов питания или фармакологических факторов. В связи с предполагаемыми негативными последствиями от приема растительных метаболитов актуальны исследования, предполагающие оценку токсичности и безопасности данных соединений. Будущие исследования должны быть направлены на определение пороговых значений безопасного потребления, уточнение условий, при которых полифенолы из полезных превращаются во вредные, а также на выявление людей с повышенным риском возникновения побочных эффектов.

Из-за ограниченности научных данных о биоактивности и безопасности растительных метаболитов, актуально проведение работ по оценке их потенциала *in vitro*, *in vivo*. Традиционные методы, такие как исследования на животных, растениях и водорослях, являются дорогостоящими, трудоемкими и требуют большого объема образцов. Поэтому необходимы альтернативные, более экономичные и эффективные подходы, позволяющие получать достоверные и воспроизводимые анализы с использованием тест-организмов. В качестве альтернативы могут быть применены микроорганизмы, например, *Aliivibrio fischeri*, для оценки токсичности растительных полифенолов [17].

A. fischeri (ранее известная как *Vibrio fischeri*) – морская грамотрицательная факультативно-анаэробная непатогенная бактерия, которая обычно излучает сине-зеленый свет в оптимальных условиях окружающей среды, особенно при высоком содержании кислорода. Эта бактерия распространена по всему миру, преимущественно в умеренных и субтропических водах [18]. Она существует как свободноживущий сапрофит или как светопродуцирующий орган-симбионт у некоторых видов кальмаров и рыб. *A. fischeri* может служить для мониторинга токсичности водной среды [19]. Анализ ингибирования биолюминесценции с применением бактерий *A. fischeri* используется для оценки острой токсичности химических соединений [20]. Биолюминесценция, производимая этими бактериями, представляет собой метаболическую активность, которая может быть нарушена токсикантами, что делает ее надежным индикатором токсичности различных химических веществ [21, 22].

Бактерии *A. fischeri* излучают свет как побочный продукт клеточного дыхания, когда бактерии достигают критической плотности клеток. Оперон *lux* экспрессирует фермент люциферазу, который в присутствии кислорода катализирует реакцию окисления, высвобождающую энергию в виде сине-зеленого света [18]. Поскольку эта реакция зависит от общего метаболизма микробов, ряд соединений, негативно влияющих на метаболические процессы бактерий, вызывает наличие контрастных темных пятен на биолюминесцентном фоне пластины для тонкослойной хроматографии. Этот метод рассматривается как универсальный биологический метод, пригодный для обнаружения биологически активных соединений [23].

Тест на ингибирование биолюминесценции часто выбирается первым в серии тестов благодаря своей скорости и низкой стоимости. Растущий интерес к нему обусловлен тем, что токсическое воздействие веществ на различные организмы зачастую сходно. Таким образом, наблюдаемое подавление люминесценции у бактерии может указывать на потенциальную токсичность для высших организмов. Этот метод оценки токсического воздействия является быстрым, простым, чувствительным и экономически эффективным, предоставляя ценную информацию о токсичности и экотоксичности [24].

Актуальны исследования, направленные на изучение влияния растительных метаболитов на представителей микробиоты желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) человека. Так как дисбактериоз (нарушение соотношения нормальных представителей микробиоты к условно-патогенным и патогенным) приводит к нарушению нормального функционирования, физиологических процессов организма-хозяина, следовательно, к развитию социально-значимых заболеваний – сердечно-сосудистым нарушениям, развитию ожирения, рака и т. п. [25, 26]. Исследования показывают влияние растительных метаболитов на ось «кишечник-мозг», т. е. полифенолы регулируют выработку различных гормонов, эффективны в снижении нейровоспаления,

дисфункции нейротрансмиттеров и гибели нейронов, связанных с болезнями Альцгеймера и Паркинсона. Употребление полифенолов влияет на состав микробиоты кишечника. Следовательно, важно, чтобы полифенолы не подавляли рост полезной микрофлоры, для чего целесообразно проводить исследования *in vitro* по оценке влияния растительных метаболитов на представителей молочнокислых бактерий [27–30].

Цель данной работы заключалась в оценке токсичности ряда растительных метаболитов *in vitro*, с использованием *A. fischeri*, и влияния на ряд представителей микробиоты ЖКТ.

Проведенный авторами обзор литературы показал, что в научной сфере присутствует ограниченное количество работ, посвященных изучению токсичности растительных метаболитов с помощью *A. fischeri* (рис. 1). Следовательно, новизна данной работы заключалась в исследовании токсичности рутина, кверцетина, кемпферола, байкалина, вогонина, розмариновой и транскоричной кислот с помощью *A. fischeri*.

Объекты и методы исследования

В работе использовались биологически активные соединения, выделенные из каллусных, суспензионных и корневых культур растений: рутин и розмариновая кислота, выделенные из *Pulmonaria officinalis* L.; кверцетин и кемпферол – из *Ginkgo biloba* L.; транскоричная кислота, байкалин и вогонин – из *Scutellaria baicalensis* L.

Данные соединения получены на ранних этапах работы; методики получения, извлечения и очистки данных веществ отражены в ранее опубликованных работах научного коллектива [3, 31–34]. Степень чистоты каждого соединения ≥ 94 %.

В исследовании применяли растворы данных объектов исследования. Для чего вещества в количестве 5 мг растворяли в 10 мл 20 % раствора этанола. Для получения однородного раствора навеску вещества в спирте помещали в ультразвуковую ванну Stegler 3DT (Stegler, Китай) на 1 мин.

В эксперименте по оценке токсичности в качестве контроля использовалось вещество с известной токсичностью – *n*-аминофенол (ч.д.а., Central Drug House, Индия). Получение раствора вещества аналогично получению растворов объектов исследования, представлено ранее.

Приготовление раствора с биолюминесцентными бактериями BioFix Lumi (Macherey-Nagel, Германия) осуществлялось по инструкции поставщика. Замороженный реактивационный раствор BioFix Lumi (в соответствии с DIN EN ISO 11348-2) переносили в холодильную камеру ХЛ-340 POZIS (ПОЗиС, Россия) для биоразмораживания при температуре +4 °С на сутки. Затем температуру раствора доводили до +15 °С на водяной бане ПЭ-4310 (ЭКРОСХИМ, Россия) в течение 10 мин и оставляли в термоконтейнере. Пробирку с реагентом глубокой заморозки, содержащую люминесцентные бактерии *Aliivibrio fischeri*, непосредственно

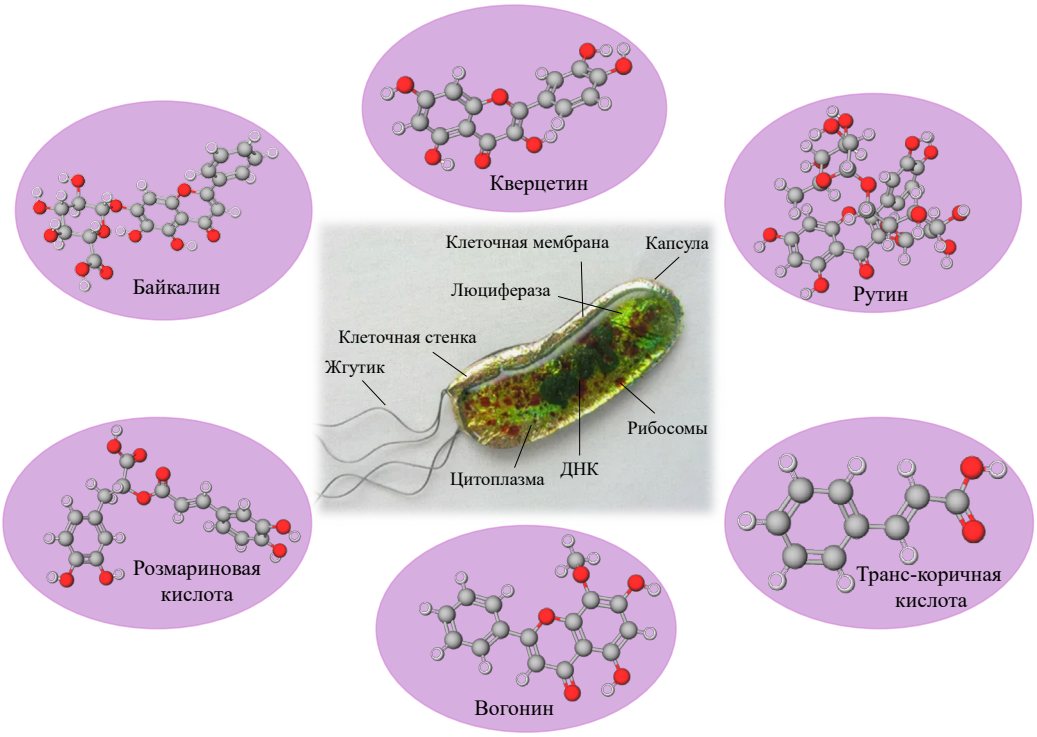


Рисунок 1. Объекты исследования и строение *Aliivibrio fischeri*

Figure 1. Structure of plant metabolites and *Aliivibrio fischeri*

перед реактивацией, доставали из морозильной камеры и добавляли 1 мл раствора BioFix Lumi для реактивации. Затем биолюминесцентные бактерии размораживали и растворяли на водяной бане в течение 2 мин. Пробирку с ресуспендированными бактериями помещали на водяную баню, доводили до +15 °С в течение 15 мин.

Оценка токсичности объектов исследования с помощью *A. fischeri* осуществлялась посредством тонкослойной хроматографии [21, 22]. Растворы объектов исследования и контроля в количестве 10 мкл наносились на линию старта с применением градуированного микрошприца МШ-10 (ЭКРОСХИМ, Россия). Растворитель тщательно удалялся. Для тонкослойной хроматографии использовалась пластина марки АФ-А – хроматографические пластинки Sorbfil 254 УФ размером 10 × 15 см на алюминиевой подложке, толщиной слоя 90–120 мкм и с размером частиц 8–12 мкм (ИМИД, Россия). На пластины наносили растворы образцов полосой 5–10 мм с помощью механического аппликатора АПА-2 (ИМИД, Россия), затем производили тщательное удаление растворителя на воздухе. Пластину помещали в камеру для тонкослойной хроматографии с подвижной фазой, состоящей из раствора бутанола, уксусной кислоты и воды в объемном соотношении 60:15:26 соответственно.

Фиксирование естественной флуоресценции образца осуществлялось в денситометре (ИМИД, Россия) с системой фотофиксации Handycam HDR-CX405 (Sony, Япония) в УФ-свете (254, 365 нм). Методом «наката» производили обработку пластины суспензией микроорганизмов и фиксировали изменение флуоресценции отдельно взятых пятен с экспозицией 0, 3, 5, 10, 15 мин. Для приготовления суспензии микроорганизмов мутностью 0,5 МакФарланда применяли денситометр DEN-1 (BioSan, Латвия).

Для оценки влияния растворов объектов исследования на ряд представителей микробиоты желудочно-кишечного тракта использовали метод диффузии в лунках агара [35]. Для исследования использовали следующие штаммы микроорганизмов: *Propionibacterium jensenii* (B-6085); *Propionibacterium freudenreichii* (B-11921); *Lactobacillus freudenreichii* subsp. *freudenreichii* (B-6561); *Lactobacillus plantarum* (B-884); *Bifidobacterium longum* (AC-1257); *Bifidobacterium bifidum* (AC-1779).

Микроорганизмы приобретались в коллекции всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов ГосНИИ генетики и селекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» (Россия). Суспензию микроорганизмов готовили в 0,1 % физиологическом растворе до достижения плотности 0,5 по МакФарланду. Затем 300 мкл полученной суспензии распределяли по поверхности среды MRS Агар, Агар М17 и Бифидум-среды (выбор зависел от вида микроорганизма) при помощи шпателя Дригальского. Среды приобретены в государственном научном центре прикладной микробиологии и биотехнологии (Россия). Через 5 мин после нанесения суспензии тест-штаммов делали лунки диаметром 8 ± 1 мм. В лунки вносили по 50 мкл исследуемого раствора биологически активного вещества. В качестве контроля использовали 20 % этанол и воду. Инкубацию проводили в течение 72 ч при температуре, указанной в паспортах штаммов. Влияние исследуемых растворов на выделенные штаммы интерпретировали, измеряя диаметр ареола зоны ингибирования представителей нормальной микробиоты. Микробиологические исследования выполнялись в стерильных условиях бокса UVC/T-AR (BioSan, Латвия).

Результаты и их обсуждение

Токсичность исследуемых объектов оценивали с помощью светящихся микроорганизмов *Aliivibrio fischeri*. Метод основан на определении снижения флуоресценции микроорганизма под действием исследуемого образца, по сравнению со стандартом (контролем). Степень подавления интенсивности свечения в образце является мерой его токсичности. Диапазон измерения от 0 до 100 % ингибирования. Интерпретация результатов определялась на проценте ингибирования интенсивности свечения в образце относительно неподавленного контроля [21, 22]. На пластине для тонкослойной хроматографии, обработанной суспензией бактерий, вещества-токсиканты детектировались как темные пятна на люминесцирующем фоне с различной интенсивностью флуоресценции.

Результаты исследования представлены в виде денситограмм на рисунке 2. На рисунке 3 представлена общая денситограмма образцов после обработки биолюминесцентными бактериями *A. fischeri*.

На рисунке 3 видно, что образцы рутина из *Pulmonaria officinalis* L., кверцетина из *Ginkgo biloba* L., вогонина из *Scutellaria baicalensis* L. и байкалина из *Scutellaria baicalensis* L. выраженно подавляют свечение биолюминесцентных бактерий *A. fischeri.* Одной из причин изменения интенсивности бактериальной биолюминесценции, помимо воздействия токсикантов на метаболические пути или индукцию генной экспрессии, может являться гибель микробной клетки, сопровождающаяся пространственной дезорганизацией ферментной системы генерации свечения. Следовательно, данные вещества проявляют антимикробное действие по отношению к *A. fischeri*.

Полученные результаты подтвердили возможность использования биолюминесценции *A. fischeri* для выявления антимикробных свойств [36].

Результаты исследования по влиянию контроля (*n*-аминофенола) представлены в виде денситограммы (рис. 4).

Результаты исследования показали, что контрольное вещество – *n*-аминофенол (известный токсикант) – проявляло ингибирующее действие на бактериальную суспензию, при этом сила хемилюминесценции составила 8,9 % (рис. 4).

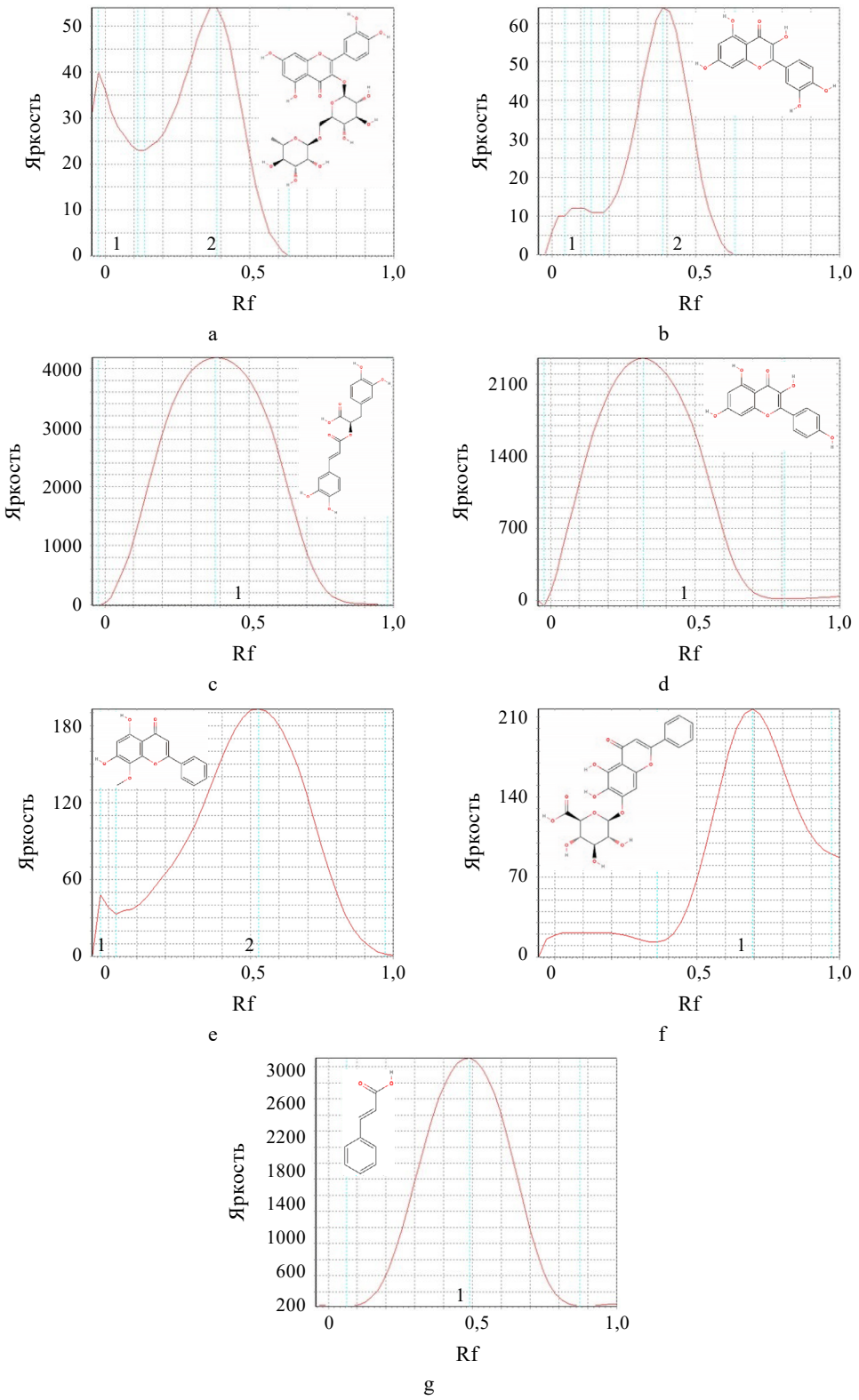


Рисунок 2. Денситограммы полученные в ходе анализа *Aliivibrio fischeri* на токсичность объектов исследования с помощью тонкослойной хроматографии: a – рутин из *Pulmonaria officinalls* L.; b – кверцетин из *Ginkgo biloba* L.; c – розмариновая кислота из *Pulmonaria officinalls* L.; d – кемпферол из *Ginkgo biloba* L.; e – вогонин из *Scutellaria baicalensis* L.; f – байкалин из *Scutellaria baicalensis* L.; g – *транс*-коричная кислота из *Scutellaria baicalensis* L.

Figure 2. Results of thin-layer chromatography on *Aliivibrio fischeri*: a – rutin (*Pulmonaria officinalis* L.); b – quercetin (*Ginkgo biloba* L.); c – rosmarinic acid (*Pulmonaria officinalis* L.); d – kaempferol (*Ginkgo biloba* L.); e – wogonin (*Scutellaria baicalensis* L.); f – baicalin (*Scutellaria baicalensis* L.); and g – trans-cinnamic acid (*Scutellaria baicalensis* L.)

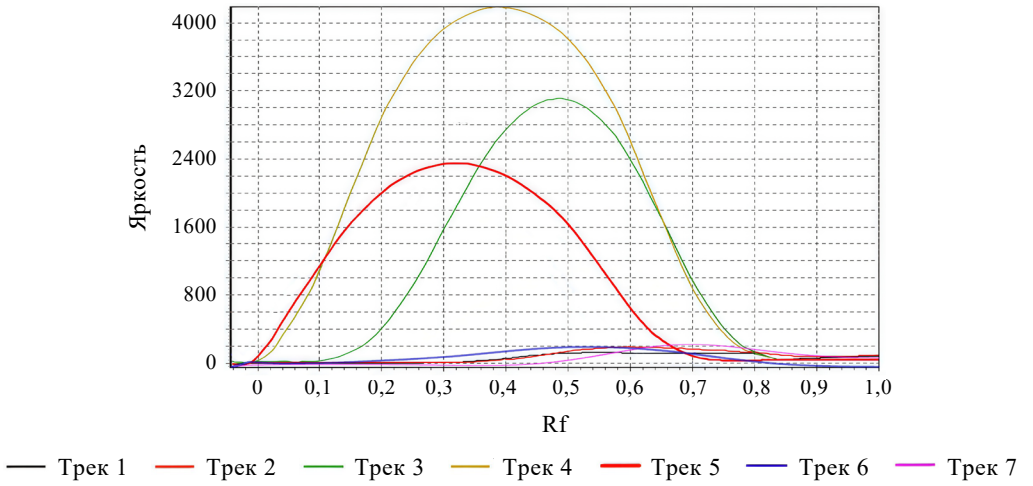


Рисунок 3. Общая денситограмма образцов после обработки биолюминесцентными бактериями *Aliivibrio fischeri:* трек 1 – рутин *Pulmonaria officinalis* L.; трек 2 – кверцетин из *Ginkgo biloba* L.; трек 3 – транс-коричная кислота *Scutellaria baicalensis* L.; трек 4 – розмариновая кислота из *Pulmonaria officinalis* L.; трек 5 – кемпферол из *Ginkgo biloba* L.; трек 6 – вогонин из *Scutellaria baicalensis* L.; трек 7 – байкалин из *Scutellaria baicalensis* L.

Figure 3. Densitograms after treatment with bioluminescent *Aliivibrio fischeri*: track 1 – rutin (*Pulmonaria officinalis* L.); track 2 – quercetin (*Ginkgo biloba* L.); track 3 – trans-cinnamic acid (*Scutellaria baicalensis* L.); track 4 – rosmarinic acid (*Pulmonaria officinalis* L.); track 5 – kaempferol (*Ginkgo biloba* L.); track 6 – wogonin (*Scutellaria baicalensis* L.); and track 7 – baicalin (*Scutellaria baicalensis* L.)

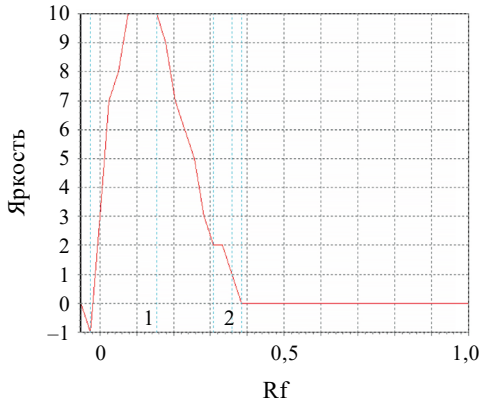


Рисунок 4. Денситограмма люминисценции бактериальной суспензии после воздействия *n*-аминофенола

Figure 4. Bacterial luminescence after exposure to *n*-aminophenol

Таблица 1. Значения интенсивности свечения (выживания) тест культуры в образцах, по сравнению с неподавленным контролем, %

Table 1. Luminescence intensity (survival rate): Test cultures vs. control, %

Вещество	Интенсивность сигнала
Рутин	13,90
Кверцетин	5,70
Транс-коричная кислота	100,00
Розмариновая кислота	64,00
Кемпферол	89,30
Байкалин	27,91
Вогонин	1,19

Сравнение полученных результатов по влиянию объектов исследования и контрольного вещества отражено в таблице 1.

Исходя из полученных результатов, образцы – рутин, кверцетин, вогонин и байкалин (рис. 3; треки 1, 2, 6, 7) – выраженно подавляли хемилюминисценцию при тестировании. Образцы транс-коричной кислоты (рис. 3; трек 3) и кемпферола (рис. 3; трек 5) обладали 50 % ингибирующей активностью. Образец розмариновой кислоты (рис. 3; трек 4) не проявлял ингибирующей активности.

Так как авторами в ходе литературного обзора по тематике исследования не удалось найти научные публикации, в которых описано изучение токсичности растительных метаболитов с помощью *A. fischeri* – нет возможности сравнить полученные результаты.

Результаты по оценке влияния объектов исследования на ряд тест-штаммов (диаметр лунки в 8 ± 1 мм) отражены в таблице 2.

В ходе проведенных исследований выявлено, что растворитель (20 % этанол) оказывал ингибирующее действие на рост молочнокислых тест-штаммов. Полученные результаты необходимо интерпретировать с учетом антимикробной активности растворителя. Установлено, что раствор рутина не влиял на лактобактерии В-6561 и В-884, а также бифидобактерии АС-1257 и АС-1779. Предположительно, наличие рутина в объекте исследования устраняло антимикробное действие растворителя (20 % этанола). Раствор рутина подавлял рост пропионовокислых штаммов В-6085 и В-11921. Аналогичные результаты получены для растворов транс-коричной кислоты и кверцетина.

Таблица 2. Диаметры зоны подавления роста тест-штаммов под воздействием объектов исследования, мм.

Table 2. Effect of plant metabolites on gastrointestinal test strains: Growth inhibition area, mm

Объект	Тест-штаммы					
	B-6085	B-11921	B-6561	B-884	AC-1257	AC-1779
Вода	–	–	–	–	–	–
20 % этанол	11,6 ± 0,2	10,9 ± 0,4	12,1 ± 0,3	12,2 ± 0,4	11,3 ± 0,5	11,0 ± 0,1
Рутин	11,7 ± 0,2	12,7 ± 0,4	–	–	–	–
Розмариновая кислота	–	–	–	–	–	–
Транс-коричная кислота	10,3 ± 0,5	10,3 ± 0,5	–	–	–	–
Кверцетин	12,0 ± 0,2	12,7 ± 0,1	–	–	–	–
Кемпферол	–	–	+	+	+	+
Байкалин	–	–	–	–	–	–
Вогонин	–	–	–	–	–	–

Примечание: «–» – отсутствие влияния; «+» – стимулирование роста. Результаты представлены в виде среднего значения ± стантартное отклонение. Note: "–" – no effect; "+" – growth stimulation (mean ± standard deviation).

Антимикробная активность данных растворов уменьшалась в ряду кверцетин > рутин > транс-коричная кислота.

Раствор кемпферола не влиял на пропионовокислые штаммы B-6085 и B-11921. Наличие кемпферола устраняло антимикробное действие 20 % этанола. По отношению к лактобактериям B-6561 и B-884, бифидобактериям AC-1257 и AC-1779 раствор кемпферола стимулировал рост данных штаммов, несмотря на наличие растворителя. В научной литературе обнаружены данные, свидетельствующие, что кемпферол стимулирует увеличение лактобактерий [37]. В работе Y. Shimojo *et al.* [38] выявлено, что *Lactobacillus paracasei* A221 увеличивал биодоступность кемпферола. В исследовании K. Tkacz *et al.* [39] показано, что штаммы *Lactobacillus* и *Bifidobacterium* способны увеличить биодоступность кемпферола. Следовательно, он не оказывал подавляющее действие на рост лактобактерий и бифидобактерий.

Байкалин, вогонин и розмариновая кислота не влияли на рост тест-штаммов и устраняли антимикробное действие 20 % этанола.

Выводы

В данной работе с помощью анализов *in vitro* устанавливалась токсичность ряда растительных метаболитов и их влияние на ряд бактерий – представителей микробиоты желудочно-кишечного тракта человека. Рутин, кверцетин, вогонин и байкалин подавляли флуоресценцию *Aliivibrio fischeri*, следовательно, проявляли токсичность по отношению к нему. Подавление роста пропионовокислых бактерий демонстрировали растворы кверцетина, рутина и транс-коричной кислоты. Кемпферол стал одним из объектов исследования, стимулирующих рост лактобактерий и бифидобактерий. Ряд растительных метаболитов, активно использующийся среди потребителей, оказывал негативное влияние на микроорганизмы, задействованные в исследовании. Данное негативное воздействие на рост штаммов обусловлено использованием растворителя (20 % этанола). Необходимы дополнительные исследования по оценке токсичности и влияния на представителей нормальной микробиоты, применяя более сложные тест-организмы. Следовательно, использование *A. fischeri* подходит для оценки токсичности растительных метаболитов, однако данная работа должна быть промежуточным этапом, которому последует оценка токсичности *in vivo* с использованием более сложных тест-животных.

Критерии авторства

Авторы были в равной степени вовлечены в написание рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

The authors made an equal contribution to the research and bear equal responsibility for any potential plagiarism.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Vesnina AD, Milentyeva IS, Le VM, Fedorova AM, Altshuler OG, *et al*. Quercetin isolated from *Hedysarum neglectum* Ledeb. as a preventer of metabolic diseases. Foods and Raw Materials. 2025;13(1):192–201. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-1-633

2. Фролова А. С., Фокина А. Д., Веснина А. Д., Милентьева И. С., Ле В. М. и др. Изучение геропротекторного потенциала *in vivo* метаболита *Hedysarum neglectum*. Бутлеровские сообщения. 2024. Т. 80. № 10. С. 59–67. [Frolova AS, Fokina AD, Vednina AD, Milentyeva IS, Le VM, *et al*. Study of the geroprotective potential *in vivo* of the metabolite *Hedysarum neglectum*. 2024;80(10):59–67. (In Russ.)] https://elibrary.ru/LYMEYQ

3. Dmitrieva A, Kozlova O, Atuchin V, Milentieva I, Vesnina A, *et al*. Study of the effect of baicalin from *Scutellaria baicalensis* on the gastrointestinal tract normoflora and *Helicobacter pylori*. International Journal of Molecular Sciences. 2023; 24(15):11906. https://doi.org/10.3390/ijms241511906

4. Милентьева И. С., Остапова Е. В., Ларичев Т. А., Веснина А. Д., Федорова А. М. Биофункциональная активность *in vivo* хлорогеновой кислоты и биоханина А, выделенных из экстрактов каллусной культуры *Trifolium pratense* L. Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 4. С. 754–765. [Milentyeva IS, Vesnina AD, Fedorova AM, Ostapova EV, Larichev TA. Chlorogenic acid and biohanin A from *Trifolium pratense* L. callus culture extract: Functional activity *in vivo*. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(4):754–765. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2475

5. Vesnina A, Milentyeva I, Minina V, Kozlova O, Asyakina L. Evaluation of the *in vivo* anti-atherosclerotic activity of quercetin isolated from the hairy roots of *Hedysarum neglectum* Ledeb. Life. 2023;13(8):1706. https://doi.org/10.3390/life13081706

6. Demirel S, Yilmaz DA. Effects of flavonoids on vascular activity. Global Translational Medicine. 2024;3(2):2458. https://doi.org/10.36922/gtm.2458

7. Qayum J, Bibi A, Preet G, Farid A. Flavonoid associated preclinical and clinical trials involved in insulin resistance/hyperglycemia, obesity, liver intoxication, aging, and cardiovascular diseases. In: Mishra N, Ashique S, Gowda JBH, Farid A, Garg A, editors. Role of flavonoids in chronic metabolic diseases: From bench to clinic. Beverly, MA: Scrivener Publishing; 2024. pp. 571–589. https://doi.org/10.1002/9781394238071.ch16

8. Ye D, Moon JH, Jung GY. Recent progress in metabolic engineering of escherichia coli for the production of various C4 and C5-dicarboxylic acids. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2023;71(29):10916–10931. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c02156

9. Duda-Chodak A, Tarko T. Possible side effects of polyphenols and their interactions with medicines. Molecules. 2023;28(6):2536. https://doi.org/10.3390/molecules28062536

10. Gonzales GB, Smagghe G, Grootaert C, Zotti M, Raes K, *et al*. Flavonoid interactions during digestion, absorption, distribution and metabolism: A sequential structure-activity/property relationship-based approach in the study of bioavailability and bioactivity. Drug Metabolism Reviews. 2015;47(2):175–190. https://doi.org/10.3109/03602532.2014.1003649

11. Bhamre VG, Deore PD, Amrutkar RD, Patil VR. Vinod Polyphenols: The interactions with CYP 450 isoenzymes and effect on pharmacokinetics of drugs. Current Trends in Pharmacy and Pharmaceutical Chemistry. 2022;4(1):13–23. https://doi.org/10.18231/j.ctppc.2022.004

12. Miadoková E. Isoflavonoids – An overview of their biological activities and potential health benefits. Interdisciplinary Toxicology. 2009;2(4):211–218. https://doi.org/10.2478/v10102-009-0021-3

13. Eghbaliferiz S, Iranshahi M. Prooxidant activity of polyphenols, flavonoids, anthocyanins and carotenoids: Updated review of mechanisms and catalyzing metals. Phytotherapy Research. 2016;30(9):1379–1391. https://doi.org/10.1002/ptr.5643

14. Sakihama Y, Cohen MF, Grace SC, Yamasaki H. Plant phenolic antioxidant and prooxidant activities: Phenolics-induced oxidative damage mediated by metals in plants. Toxicology. 2002;177(1):67–80. https://doi.org/10.1016/S0300-483X(02)00196-8

15. Zheng LF, Dai F, Zhou B, Yang L, Liu ZL. Prooxidant activity of hydroxycinnamic acids on DNA damage in the presence of Cu(II) ions: Mechanism and structure – activity relationship. Food and Chemical Toxicology. 2008;46(1):149–156. https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.07.010

16. Vanhees K, de Bock L, Godschalk RWL, van Schooten FJ, van Waalwijk van Doorn-Khosrovani SB. Prenatal exposure to flavonoids: Implication for cancer risk. Toxicological sciences. 2011;120(1):59–67. https://doi.org/10.1093/toxsci/kfq388

17. Białk-Bielińska A, Grabarczyk Ł, Mulkiewicz E, Puckowski A, Stolte S, *et al*. Mixture toxicity of six pharmaceuticals towards *Aliivibrio fischeri, Daphnia magna*, and *Lemna minor*. Environmental Science and Pollution Research. 2022;29:26977–26991. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17928-y

18. Хрульнова С. А., Манухов И. В., Зарубина А. П., Завильгельский Г. Б. *Aliivibrio logei* KCh1 (изолят камчатка): биохимические и люминесцентные характеристики, клонирование *lux*-оперона. Микробиология. 2010. Т. 79. № 3. С. 368–375. [Khrulnova SA, Manukhov IV, Zavilgelsky GB, Zarubina AP. *Aliivibrio logei* KCh1 (Kamchatka isolate): Biochemical and bioluminescence characteristics and cloning of the *lux* operon. Microbiology. 2010;79(3):368–375. (In Russ.)] https://elibrary.ru/MSQKKN

19. Rodrigues S, Alves RS, Antunes SC. Impact of caffeine on aquatic ecosystems: Assessing trophic-level biological responses. Journal of Xenobiotics. 2025;15(3):86. https://doi.org/10.3390/jox15030086

20. Yao Z, Wang D, Wu X, Lin Z, Long X, *et al*. Hormetic mechanism of sulfonamides on *Aliivibrio fischeri* luminescence based on a bacterial cell-cell communication. Chemosphere. 2019;215:793–799. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.045

21. Abbas M, Adil M, Ehtisham-Ul-Haque S, Munir B, Yameen M, *et al*. *Vibrio fischeri* bioluminescence inhibition assay for ecotoxicity assessment: A review. The Science of The Total Environment. 2018;626:1295–1309. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.066

22. Yang Z, Zhu Y, Dong Z, Hao Y, Wang C, *et al*. Engineering bioluminescent bacteria to boost photodynamic therapy and systemic anti-tumor immunity for synergistic cancer treatment. Biomaterials. 2022;281:121332. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2021.121332

23. Fenyvesi É, Berkl Z, Ligethy L, Fekete-Kertész I, Csizmazia M, *et al*. Long-chain alkylthio cyclodextrin derivatives for modulation of quorum-sensing-based bioluminescence in *Aliivibrio fischeri* model system. International Journal of Molecular Sciences. 2024;25(13):7139. https://doi.org/10.3390/ijms25137139

24. Tongur S, Yıldız S. Toxicity tests using flurbiprofen, naproxen, propranolol, and carbamazepine on *Lepidium sativum*, *Daphnia magna*, and *Aliivibrio fischeri*. Desalination and Water Treatment. 2021;221:359–366. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27038

25. Vesnina A, Prosekov A, Atuchin V, Minina V, Ponasenko A. Tackling atherosclerosis via selected nutrition. International Journal of Molecular Sciences. 2022;23(15):8233. https://doi.org/10.3390/ijms23158233

26. 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

27. Chiu HF, Venkatakrishnan K, Golovinskaia O, Wang CK. Gastroprotective effects of polyphenols against various gastro-intestinal disorders: A mini-review with special focus on clinical evidence. Molecules. 2021;26(7):2090. https://doi.org/10.3390/molecules26072090

28. Gates EJ, Bernath AK, Klegeris A. Modifying the diet and gut microbiota to prevent and manage neurodegenerative diseases. Reviews in the Neurosciences. 2022;33(7):767–787. https://doi.org/10.1515/revneuro-2021-0146

29. Shabbir U, Rubab M, Daliri EBM, Chelliah R, Javed A, *et al*. Curcumin, quercetin, catechins and metabolic diseases: The role of gut microbiota. Nutrients. 2021;13(1):206. https://doi.org/10.3390/nu13010206

30. Mahdi L, Graziani A, Baffy G, Mitten EK, Portincasa P. Unlocking polyphenol efficacy: The role of gut microbiota in modulating bioavailability and health effects. Nutrients. 2025;17(17):2793. https://doi.org/10.3390/nu17172793

31. Чекушкина Д. Ю., Милентьева И. С., Ле В. М., Просеков А. Ю., Проскурякова Л. А. Потенциал использования метаболита бородатых корней *Scutellaria baicalensis* в качестве геропротектора. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2024. Т. 12. № 2. С. 87–95. [Chekushkina DY, Milentyeva IS, Le VM, Prosekov AYu, Proskuryakova LA. The biopotential of trans-cinnamic acid. Bulletin of South Ural State University. Series “Food and Biotechnology”. 2024;12(2):87–95. (In Russ.)] https://doi.org/10.14529/food240210

32. Dyshlyuk LS, Fedorova AM, Dolganyuk VF, Prosekov AYu. Optimization of extraction of polyphenolic compounds from medicinal lungwort (*Pulmonaria officinalis* L.). Journal of Pharmaceutical Research International. 2020;32(24):36–45. https://doi.org/10.9734/JPRI/2020/v32i2430807

33. Дышлюк Л. С., Дроздова М. Ю., Лосева А. И. Исследование показателей безопасности экстрактов каллусных культур *Pulmonaria officinalis* и их фитохимического состава на наличие биологически активных веществ с потенциальными геропротекторными свойствами. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. № 2. С. 260–271. [Dushlyuk LS, Drozdova MYu, Loseva AI. Study on safety profile in extracts of *Pulmonaria officinalis* callus cultures and their phytochemical composition for the presence bioactive substances with the potential geroprotective properties. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2021;11(2):260–271. (In Russ.)] https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-260-271

34. Федорова А. М., Дмитриева А. И., Дышлюк Л. С. Культивирование дикорастущих лекарственных растений СФО *in vitro* в целях накопления потенциальных геропротекторов. Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия. 2020. Т. 30. С. 134–138. [Fedorova AM, Dmitrieva AI, Dyshlyuk LS. Cultivation of wild medicinal plants of the SFD *in vitro* to accumulate the potential geroprotectors. Scientific papers of the North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, and Winemaking. 2020;30:134–138. (In Russ.)] https://doi.org/10.30679/2587-9847-2020-30-134-138

35. Чернин В. В., Бондаренко В. М., Червинец В. М., Базлов С. Н. *Helicobacter pylori* как составная часть микробиоценоза мукозной микрофлоры эзофагогастродуоденальной зоны в норме и патологии. Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2011. № 8. Р. 66–72. [Chernin VV, Bondarenko VM, Chervinets VM, Bazlov SN. *Helicobacter pylori* as a part of microbiocenosis of mucosal microflora esophago- gastroduodenal zone in the norm and pathology. Experimental and clinical gastroenterology. 2011;(8):66–72. (In Russ.)] https://elibrary.ru/TBZEHN

36. Алешина Е. С., Каримов И. Ф., Дерябин Д. Г. Методы биолюминесцентного тестирования. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2011. 56 с. [Aleshina ES, Karimov IF, Deryabin DG. Methods of bioluminescence testing. Orenburg: Orenburg State University; 2011, 56 p. (In Russ.)] https://elibrary.ru/XNCTGL

37. Geldert C, Abdo Z, Stewart JE, A HS. Dietary supplementation with phytochemicals improves diversity and abundance of honey bee gut microbiota. Journal of Applied Microbiology. 2021;130(5):1705–1720. https://doi.org/10.1111/jam.14897

38. Shimojo Y, Ozawa Y, Toda T, Igami K, Shimizu T. Probiotic *Lactobacillus paracasei* A221 improves the functionality and bioavailability of kaempferol-glucoside in kale by its glucosidase activity. Scientific reports. 2018;(8):9239. https://doi.org/10.1038/s41598-018-27532-9

39. Tkacz K, Połomska X, Turkiewicz IP, Wojdyło A. Enhancement of bioaccessibility and modulation of green tea phenolic compounds through pre-transformation by Lactobacillus and Bifidobacterium strains. Food Research International. 2025;217:116848. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116848

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Ле Виолета Мироновна / Violeta M. Le ORCID 0000-0002-9546-6633; eLIBRARY SPIN 4573-3499
Веснина Анна Дмитриевна / Anna D. Vesnina ORCID 0000-0002-4552-7418; eLIBRARY SPIN 9668-2838
Просеков Александр Юрьевич / Alexander Yu. Prosekov ORCID 0000-0002-5630-3196; eLIBRARY SPIN 5203-5725
Долганюк Вячеслав Фёдорович / Vyacheslav F. Dolganyuk ORCID 0000-0003-0603-7456; eLIBRARY SPIN 5837-4810
Ларичев Тимофей Альбертович / Timothy A. Larichev ORCID 0000-0003-0166-2527; eLIBRARY SPIN 9005-9809
Юстратов Владимир Петрович / Vladimir P. Yustratov ORCID 0000-0002-1779-4332; eLIBRARY SPIN 3578-5617

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2617
https://elibrary.ru/MGDYNH

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Динамика формирования растительного покрова техногенно нарушенных участков в зависимости от мощности почвенной закладки и биологической активации (на примере угольного разреза)

М. А. Осинцева*, Е. А. Жидкова

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 26.09.2025
Принята после рецензирования: 01.11.2025
Принята к публикации: 11.11.2025

**e-mail: k1marial@inbox.ru*
© М. А. Осинцева, Е. А. Жидкова, 2025

Аннотация.
Рекультивация нарушенных земель является критически важным этапом горнодобывающей деятельности, направленным на восстановление экологического баланса и продуктивности ландшафтов. Выбор стратегии рекультивации существенно влияет на скорость и эффективность восстановления почв, как показали исследования, сравнивающие различные подходы к восстановлению свойств почв и их водопроницаемости. Целью данного исследования являлась оценка влияния мощности почвенной закладки и биологической активации на эффективность восстановления растительного покрова на техногенно нарушенных территориях отвала угольного разреза.
В ходе трехлетнего полевого эксперимента (2023–2025 гг.) на территории отвала угольного разреза (Кемеровская область – Кузбасс, Россия) созданы три типа экспериментальных участков, моделирующих различные подходы к рекультивации: технозем гумусогенный, технозем литогенный и эмбриозем инициальный. На каждом участке высаживались древесно-кустарниковые культуры и высевались травосмеси. Приживаемость древесных растений учитывалась визуально по принципу «наличие–выпад», с фиксацией критериев гибели и успешной приживаемости. Проективное покрытие трав оценивалось с помощью дистанционного определения индекса NDVI, рассчитанного по данным аэрофотосъемки и обработанного в Agisoft Metashape Professional. Биопрепарат создан на основе консорциума штаммов *Bacillus subtilis*, отобранных по высокой антиоксидантной и фитогормональной активности, показавшего максимальное стимулирующее действие на прорастание травосмеси.
Эффективность биопрепарата существенно зависела от условий субстрата. На благоприятном техноземе гумусированном препарат не оказывал положительного действия: приживаемость сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753) в варианте с биопрепаратом составила 66,7 %, что было ниже контрольных 85,3 %. На техноземе литогенном эффект был видоспецифичным: приживаемость тополя пирамидального (*Populus nigra* L., 1753) достигла 100,0 %, тогда как у жимолости сизой (*Lonicera dioica* L., 1753) снизилась до 63,6 % к 2025 г. против 84,1 % в контроле. Наиболее негативные результаты получены на эмбриоземе, где применение препарата приводило к значительному снижению приживаемости, по сравнению с контролем, например, у аронии черноплодной (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott, 1821) – 52,9 против 70,6 %. Проективное покрытие травосмесей во всех вариантах к 2024 г. достигало 100,0 %, однако в первый год в вариантах с биопрепаратом оно часто было ниже.
Применение биопрепарата не являлось универсальным решением и его эффективность детерминирована типом почвенного субстрата и видовой специфичностью растений. Наилучшие перспективы использования выявлены для промежуточных по плодородию техноземов литогенных, в то время как в оптимальных условиях его применение нецелесообразно, а в экстремальных – может оказывать негативный эффект.

Ключевые слова. Рекультивация нарушенных земель, биопрепарат, технозем, микробные консорциумы, приживаемость растений, проективное покрытие, NDVI, угольный разрез, фиторемедиация, техногенный субстрат

Финансирование. Работа выполнена в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р, комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» («Чистый уголь – зеленый Кузбасс»), мероприятие 3.1 «Экополигон мирового уровня технологий рекультивации и ремедиации». При финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-1200 от 28.09.2022 г.).

Для цитирования: Осинцева М. А., Жидкова Е. А. Динамика формирования растительного покрова техногенно нарушенных участков в зависимости от мощности почвенной закладки и биологической активации (на примере угольного разреза). Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 885–902. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2617

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2617
https://elibrary.ru/MGDYNH

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

Dynamics of Vegetation Development on Post-Mining Areas: Soil Thickness and Bioactivation

Maria A. Osintseva*, Elena A. Zhidkova

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: 26.09.2025
Revised: 01.11.2025
Accepted: 11.11.2025

**e-mail: k1marial@inbox.ru*
© M.A. Osintseva, E.A. Zhidkova, 2025

Abstract.
Reclamation of disturbed lands restores the post-mining ecosystem and land use. It is an essential stage of any mining operation. The appropriate reclamation strategy improves the speed and effectiveness of soil reclamation. For instance, the soil thickness and the bioactivation method determine the effectiveness of plant reclamation on depleted open-pit coal mines.
This three-year field experiment (2023–2025) focused on an open-pit coal mine wasteland in the Kemerovo Region, Russia. It involved three types of experimental plots that simulated different reclamation approaches: humus-producing technosol, lithogenic technosol, and initial embryozem. Each plot was planted with trees, shrubs, and grass. The survival of woody plants was assessed visually, with mortality and survival criteria recorded. The grass cover status was assessed by Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), obtained from aerial photography and processed in Agisoft Metashape Professional. The biopreparation included a consortium of *Bacillus subtilis* strains selected for high antioxidant and phytohormonal activity, which demonstrated the greatest stimulating effect on grass seed germination.
The effectiveness of the biopreparation depended significantly on the substrate conditions. The humus-rich technosol failed to improve the biopreparation: the survival rate of Scots pine (*Pinus sylvestris* L., 1753) was 66.7%, which was below the control (85.3%). The lithogenic technosol had a species-specific effect: the survival rate of pyramidal poplar (*Populus nigra* L., 1753) reached 100.0% while that of blue honeysuckle (*Lonicera dioica* L., 1753) dropped to 63.6% by 2025 versus 84.1% in the control. The embryozem demonstrated the lowest results: the survival rate for black chokeberry (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott, 1821) was 52.9% versus the initial 70.6%. The projective grass cover reached 100.0% by 2024 on all three plots but was much lower during the first year.
The biopreparation failed to become a universal solution, and its effectiveness depended on the type of soil substrate and plant species. It proved rather effective for lithogenic technosols of intermediate fertility. However, its use seems impractical under optimal conditions and even inhibiting under extreme conditions.

Keywords. Land reclamation, biopreparation, technosol, microbial consortia, plant survival, projective cover, NDVI, coal mine, phytoremediation, technogenic substrate

Funding. The research was part of a comprehensive scientific innovative program initiated by Russian Federation Government Decree No. 1144-r, May 11, 2022: Developing and implementing new technologies in the E&P of solid minerals, industrial safety, bioremediation, and product development of deep coal processing: A consistent reduction of environmental impact and hazards (Clean Coal – Green Kuzbass), Stage 3.1: An ecological test-site of world-class reclamation and remediation technologies (Agreement No. 075-15-2022-1200, September 28, 2022).

For citation: Osintseva MA, Zhidkova EA. Dynamics of Vegetation Development on Post-Mining Areas: Soil Thickness and Bioactivation. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):885–902. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2617

Введение

Рекультивация нарушенных земель является критически важным этапом горнодобывающей деятельности, направленным на восстановление экологического баланса и продуктивности ландшафтов [1–3]. Исследования показывают, что выбор стратегии рекультивации существенно влияет на скорость и эффективность восстановления почв. В работе J. Hu *et al.* [4], проведенной в условиях северной части Лессового плато в Китае, сравнивалось влияние различных моделей рекультивации – растительной (смешанные кустарниково-травяные сообщества) и сельскохозяйственной – на свойства почвы и ее водопроницаемость. В результатах отражено, что растительная рекультивация, особенно смешанные посадки люцерны и облепихи, приводит к более значительному улучшению физических свойств почвы (плотность, пористость, стабильность агрегатов) и инфильтрационной способности, по сравнению с сельскохозяйственным использованием. При этом использование тяжелой сельскохозяйственной

техники оказывает негативное влияние на почвенную структуру и инфильтрацию. Ключевым фактором, определяющим водопроницаемость, выступает состояние почвенной пористости [4].

В исследовании B. Čížková *et al.*, проведенном на отвалах после добычи бурого угля в Чешской Республике, сравнивалось развитие химических и микробных свойств почвы на рекультивированных и самозарастающих лугах [5]. Нанесение потенциально-плодородного слоя создало более благоприятные условия для накопления органического вещества и питательных элементов. На рекультивированных участках наблюдалось значительное увеличение запасов углерода и азота с возрастом, в то время как на самозарастающих территориях существенных изменений не происходило. Потенциал секвестрации углерода на рекультивированных лугах с нанесением почвенного слоя оценивался до 1,6 т/га в год, что превышало аналогичные показатели для лесистых территорий в том же регионе [5]. Это подчеркивает важность начальных условий и управленческих решений для долгосрочного накопления органического вещества в почве.

Особый интерес представляют комплексные подходы к рекультивации в условиях тропиков, обобщенные в обзоре Pratiwi *et al.* по Индонезии [6]. В работе подчеркивалось, что успешное лесовосстановление на нарушенных землях требует не только технических мероприятий (планировка ландшафта, размещение вскрышных пород, контроль кислотного дренажа), но и тщательного подбора видов растений. Рекомендуется многоэтапная стратегия, включающая посев бобовых покровных культур для борьбы с эрозией и улучшения почвенного плодородия, последующую высадку быстрорастущих видов-пионеров для создания микроклимата и интродукцию местных (аборигенных) видов для восстановления биоразнообразия и экосистемных функций. Особую роль играет применение микробных технологий, таких как инокуляция арбускулярной микоризы и клубеньковых бактерий (*Rhizobium*), что значительно повышало приживаемость и рост саженцев в стрессовых условиях нарушенных почв [6].

Мониторинг и оценка эффективности рекультивации являются неотъемлемой частью процесса. В разных юрисдикциях существуют различные системы оценки, учитывающие такие параметры, как проектирование земной поверхности, успешность лесовосстановления, контроль эрозии и седиментации. Например, в Индонезии для участков в лесном фонде особый вес при оценке придается показателям лесовосстановления (50 % от общей оценки), включая площадь, приживаемость и видовой состав [6]. Успешные кейсы продемонстрировали, что рекультивированные территории могут не только выполнять экологические функции, но и становиться центрами биоразнообразия, средой обитания для охраняемых видов (таких как орангутанги и носачи) [6], а также использоваться для рекреации, водоснабжения и научной деятельности.

C. Tu *et al.* [7] изучали эффективные методы восстановления почв, загрязненных тяжелыми металлами, что особенно актуально для рекультивации таких объектов, как угольные шламы. Работа посвящена оценке применения биоугля, а также биоугля, обогащенного специальными бактериями, для иммобилизации кадмия и меди в почве. Результаты продемонстрировали, что оба подхода значительно снижали подвижность и доступность этих опасных металлов, тем самым уменьшая их токсическое воздействие. Параллельно с этим авторы зафиксировали положительное влияние применяемых материалов на биологическую активность почвы, что выразилось в усилении ферментативных процессов. Таким образом, комбинированное использование растений и бактерий с носителем в виде биоугля представляется высокоперспективной и экологичной технологией очистки загрязненных территорий.

Спонтанная сукцессия рассматривается как эффективный подход к ремедиации нарушенных местообитаний в восстановительной экологии Центральной Европы [8]. Исследования в Чешской Республике показали, что на большинстве нарушенных территорий, за исключением экстремально токсичных субстратов, естественные процессы приводят к формированию непрерывного растительного покрова в течение 15 лет. Успешное восстановление, характеризующееся появлением местных, в том числе редких видов, наиболее вероятно на участках с умеренными условиями, окруженных природной растительностью.

В рамках исследования потенциала фитостабилизации загрязненных почв горных выработок юго-востока Испании [9] изучалась эффективность применения горчицы сарептской (*Brassica juncea* L. Czern) и ежи сборной (*Dactylis glomerata* L.) в сочетании с органическими мелиорантами – компостом и биоуглем. Оба компонента способствовали улучшению качества почвы и иммобилизации потенциально токсичных элементов, таких как кадмий, свинец и цинк; при этом компост оказал более выраженное положительное влияние на микробную биомассу и рост растений. Важно отметить, что оба вида растений продемонстрировали способность накапливать загрязняющие вещества преимущественно в корневой системе, что подтверждалось коэффициентом транслокации меньше единицы.

Исследование последствий просадки грунта вследствие подземной добычи угля в аридных условиях районов Северо-Западного Китая [10] показало значительное нарушение почвенных свойств и структуры бактериального сообщества. Нарушение целостности пород привело к потерям влаги, питательных веществ и снижению микробной биомассы, что особенно выражено в маргинальной зоне просадки. Это отразилось на таксономическом составе, сократив долю ключевых родов, таких как *Sphingomonas* и *Pseudomonas*, участвующих в цикле питательных веществ, и изменило метаболический потенциал сообщества. Так, для предотвращения

дальнейшей деградации авторы рекомендуют своевременное заполнение трещин в зоне просадки.

Современные исследования свидетельствуют о том, что успешная рекультивация нарушенных земель – комплексный процесс, эффективность которого зависит от учета местных почвенно-климатических условий, применения научно обоснованных методов восстановления почвенного плодородия и биоразнообразия, а также непрерывного мониторинга. Сравнительный анализ работ, проведенных в разных регионах мира, позволил выявить общие закономерности (важность растительного покрова, органического вещества и почвенной биоты).

Целью данного исследования являлась оценка влияния мощности почвенной закладки и биологической активации на эффективность восстановления растительного покрова на техногенно нарушенных территориях отвала угольного разреза.

Объекты и методы исследования

В рамках проведения эксперимента, направленного на разработку и оптимизацию технологий восстановления нарушенных промышленной деятельностью земель, на базе специализированного научно-технического полигона, расположенного на территории отвала угольного разреза Кемеровской области – Кузбасса (Россия), организован комплексный полевой опыт.

Ключевым моментом эксперимента стало создание трех обособленных экспериментальных участков, каждый из которых представляет собой уникальную модель формирования корнеобитаемого слоя (табл. 1). Принципиальное различие между участками заключалось в применяемой методике рекультивации, характере используемых почвообразующих материалов и их послойной структуре.

Первый экспериментальный участок (Участок 1) создан по принципу наиболее технологически сложной

Таблица 1. Характеристики экспериментальных участков рекультивации

Table 1. Experimental reclamation plots

Характеристика	Участок 1 (сектора 1.1, 1.2)	Участок 2 (сектора 2.1, 2.2)	Участок 3 (сектора 3.1, 3.2, 3.3)
Метод рекультивации	Многослойное нанесение	Однослойная отсыпка	Без завоза сторонних пород (естественное восстановление)
Структура и мощность слоев	1 потенциально-плодородный слой почвы (40–70 см); 2 плодородный слой почвы (20–40 см) сверху	Только потенциально-плодородный слой почвы (50–80 см)	Техногенный элювий (естественная смесь пород отвала)
Сформированный тип почвы	Технозем гумусогенный дифференцированный	Технозем литогенный недифференцированный	Эмбриозем инициальный
Ключевые свойства почвы	Четкая генетическая горизонтность, наличие гумусового горизонта, свойства близки к естественным почвам	Однородный профиль, слабая выраженность горизонтов, свойства унаследованы от породы	Отсутствие горизонтов, минимальное содержание органики, зачаточные признаки почвообразования



Рисунок 1. Послойное нанесение потенциально-плодородного и плодородного слоев почвы

Figure 1. Layer-by-layer application of potentially fertile and fertile soil layers

и ресурсоемкой методики, предполагающей послойное нанесение потенциально-плодородного и плодородного слоев почвы (рис. 1).

Мощность нанесенного потенциально-плодородного слоя почвы варьировалась в диапазоне от 40 до 70 см, что обеспечивало создание геохимического барьера и резервуара для развития корневых систем растений. Поверх данного слоя уложен плодородный слой почвы мощностью от 20 до 40 см, выступающий в качестве непосредственной среды для прорастания семян и начального развития фитоценоза. В результате такого последовательного нанесения сформировался полноценный почвенный покров – технозем гумусогенный дифференцированный. Данный тип антропогенной почвы характеризуется четко выраженной генетической горизонтностью, наличием аккумулированного гумусового горизонта и свойствами, приближенными к условиям естественных зональных почв, что с теоретической точки зрения создает наиболее благоприятные предпосылки для быстрого становления устойчивой и продуктивной экосистемы.

Второй участок (Участок 2) представляет собой альтернативную, менее затратную модель восстановительных работ, в рамках которой применен метод однослойной отсыпки (рис. 2).

Данная технология заключалась в формировании корнеобитаемой толщи исключительно за счет нанесения потенциально-плодородного слоя почвы мощностью от 50 до 80 см без последующего покрытия плодородным слоем почвы. Отсутствие верхнего гумусированного горизонта предопределило иные почвообразовательные процессы. Сформировавшийся здесь почвенный покров идентифицирован как технозем литогенный недифференцированный. Основными диагностическими признаками данного грунта являются однородность строения профиля на значительную глубину, слабая выраженность или полное отсутствие генетических горизонтов, а также свойства, в значительной степени унаследованные от исходной почвообразующей породы. Такой субстрат требует более длительного периода для естественного почвообразования и менее благоприятен для немедленного внедрения растительных сообществ без дополнительной мелиоративной поддержки.

Третий экспериментальный участок (Участок 3) организован с целью изучения процессов спонтанного почвообразования и является моделью наиболее экономного подхода к рекультивации. Он сформирован непосредственно на поверхности предварительно спланированного отвала, без завоза сторонних потенциально-плодородных пород (рис. 3).

Почвообразующий субстрат на данном участке представлен естественной смесью вскрышных и вмещающих пород, слагающих тело самого отвала, что делало его максимально приближенным к условиям ненарушенных промышленностью территорий. В этих условиях начальные стадии почвообразования протекают аутохтонно, что приводит к формированию почвы, классифицируемой как эмбриозем инициальный. Этот тип почвы находится на самой начальной стадии своего развития, для которой характерно отсутствие выраженной горизонтальной дифференциации, минимальное содержание органического вещества и лишь зачаточные признаки биогенной трансформации субстрата. Изучение динамики развития данного участка представляет значительный научный интерес для понимания фундаментальных процессов сукцессии в техногенных ландшафтах.

На подготовленных участках посеяны травосмеси и высажены древесно-кустарниковые виды растений. Видовой состав растений на участках варьировался в соответствии с задачами отработки технологий рекультивации, проводимых на экспериментальном полигоне, и не учитывался в данном исследовании.



Рисунок 2. Отсыпка потенциально-плодородного слоя почвы

Figure 2. Potentially fertile soil layer: Backfilling



Рисунок 3. Участок техногенного элювия

Figure 3. Man-made eluvium area

С целью биологической активации процесса восстановления растительного покрова использовался биологический препарат, созданный на основе штаммов микроорганизмов, предварительно выделенных из грунта экспериментального участка. Из образцов грунта данного участка выделено и охарактеризовано по морфолого-культуральным признакам 60 штаммов. На последующем этапе скрининга, в качестве ключевых критериев отбора промышленно ценных штаммов рассматривались показатели биологической активности: антиоксидантная и антимикробная активность, а также способность к синтезу фитогормонов – индолил-3-уксусной и гиббереллиновой кислот. По совокупности этих признаков отобрано 20 наиболее перспективных изолятов.

Для точной идентификации отобранных штаммов проведена генетическая характеристика методом секвенирования гена 16S рРНК. В результате определены следующие таксоны: *Bacillus subtilis* (штаммы № 1, 10, 16, 37), *Pseudomonas cremoricolorata* (№ 2), *Bacillus thuringiensis* (№ 6), *Lelliottia amnigena* (№ 7), *Enterobacter cloacae* (№ 9, 20), *Klebsiella pasteurii* (№ 13, 43), *Acinetobacter geminorum* (№ 24), *Pseudomonas donghuensis* (№ 27, 29), *Acinetobacter pittii* (№ 32, 44), *Acinetobacter calcoaceticus* (№ 50), *Serratia marcescens* (№ 51, 53) и *Pantoea vagans* (№ 52).

На следующем этапе работы, на основе анализа биосовместимости выделенных штаммов, сконструировано 10 микробных консорциумов. Комплексная оценка их биологической активности (по уровню антиоксидантной и антимикробной активности, а также по способности продуцировать индолил-3-уксусную и гиббереллиновую кислоты) позволила выявить наиболее функциональные ассоциации. Наибольшей активностью характеризовались консорциумы № 1 (*P. cremoricolorata, E. cloacae, K. pasteurii*), № 2 (*B. subtilis, B. subtilis, B. subtilis*), № 3 (*A. calcoaceticus, S. marcescens, P. vagans, S. marcescens*), № 4 (*E. cloacae, E.cloacae, A. pittii, A. pittii*) и № 5 (*P. cremoricolorata, E. cloacae, E. cloacae, A. geminorum, K. pasteurii, A. pittii*). Лабораторные испытания показали, что максимальное стимулирующее действие на прорастание травосмеси оказывает консорциум № 2, на основе которого инициирована разработка биопрепарата. Для культивирования данного консорциума подобран оптимальный состав питательной среды следующего состава, г/л: бульон Лурия-Бертани – 25,0; $MgSO_4$ – 0,1; сахароза – 3,0; глюкоза – 6,0; L-триптофан – 0,1 и K_2HPO_4 – 3,0.

По принципу «наличие–выпад» был проведен учет приживаемости древесно-кустарниковых растений, который представляет собой систему количественной оценки, основанную на фиксации доли сохранившихся экземпляров по отношению к общему числу первоначально высаженных растений. Учет был проведен путем визуального осмотра и подсчета живых и погибших растений на отдельных секторах экспериментальных участков в конце каждого вегетационного периода.

Первые два-три года после посадки являются критическим периодом. В это время растения проходят фазу адаптации и наиболее уязвимы к воздействию абиотических и биотических стрессоров, поэтому в этот период проводилось наиболее интенсивное наблюдение.

Ключевым критерием отнесения растения к категории «выпад» является наличие необратимых признаков гибели: полное отсутствие листового аппарата в период вегетации, усохшие и ломкие надземные части, а также разрушение корневой системы, приводящее к потере устойчивости. Напротив, индикаторами успешной приживаемости служат такие морфофизиологические показатели, как образование сильных побегов, соответствие листовых пластин видовым стандартам по размеру и окраске, а также соблюдение сезонного ритма развития.

Результаты учета оформлялись в виде ведомости, содержащей сведения о месте и дате проведения наблюдений, видовом составе растений, исходной и текущей численности, а также расчетном проценте приживаемости (отношение числа живых растений к исходному количеству).

Оценку проективного покрытия для травосмесей проводили с использованием нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI). Методика основывается на дифференциальной отражательной способности фотосинтезирующих растительных тканей в различных участках спектра. Здоровые растения характеризуются интенсивным поглощением излучения в красной области спектра (0,6–0,7 мкм) вследствие фотосинтетической активности хлорофилла и высоким отражением в ближней инфракрасной области (0,7–1,1 мкм) из-за рассеяния света внутренней структурой мезофилла. NDVI рассчитан по формуле:

$$NDVI = (NIR – Red)/(NIR + Red)$$

где NIR – отражение в ближнем инфракрасном диапазоне; Red – отражение в красном диапазоне. NDVI количественно выражает наблюдаемый контраст. Значения индекса варьировались от –1 до +1, причем более высокие значения в диапазоне (0,2 до 1,0) коррелировали с увеличением плотности и жизнеспособности растительного покрова.

Процедура оценки включала последовательные этапы сбора и обработки данных. Первичные данные получали с помощью аэрофотосъемки в видимом спектре, выполненной с применением беспилотного летательного аппарата модели DJI Phantom 4 Pro+ с установленным бортовым ГНСС-приемником.

Обработка данных осуществлялась в программном комплексе Agisoft Metashape Professional. Исходными материалами для обработки являлись фотоснимки и координаты центров проекций аэрофотоснимков. Производилась радиометрическая калибрация сырых данных, совмещение спектральных каналов и построение ортомозаики. На основе калиброванных значений яркости рассчитывался растровый слой NDVI.

Переход от значений индекса к количественной оценке проективного покрытия осуществлялся методом классификации. Ключевой задачей являлось определение порогового значения NDVI, которое сегментирует изображение на классы «растительность» и «фон» (открытый грунт, влажные участки, неорганические поверхности). Порог устанавливался эмпирически на основе анализа гистограммы распределения значений индекса, подкрепленного данными наземных наблюдений. После бинаризации растра, где пиксели, соответствующие растительности, получают значение 1, а фоновые – 0, расчет проективного покрытия выполнялся как отношение количества пикселей класса «растительность» к общему количеству пикселей в пределах исследуемого полигона.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования, проводившиеся в течение 3-х вегетационных периодов с 2023 по 2025 гг. на территории отвала угольного разреза, представляли собой масштабный научный проект, нацеленный на оценку эффективности применения биологического препарата, созданного на основе штаммов микроорганизмов, выделенных непосредственно из грунта экспериментального участка, для стимуляции приживаемости и развития древесно-кустарниковых растений и травосмесей. Ключевой особенностью методологии стала организация трех принципиально различных экспериментальных участков. Каждый из них моделировал один из реально существующих подходов к формированию корнеобитаемого слоя в практике рекультивации, что позволяло изучать процессы начального почвообразования и становления пионерных фитоценозов в экстремальных техногенных условиях.

Первый экспериментальный участок, расположенный на секторах 1.1 и 1.2, сформирован с применением наиболее интенсивной и ресурсоемкой технологии. Она предполагает послойное нанесение потенциально-плодородных пород мощностью от 40 до 70 см с последующим покрытием этого слоя полноценным плодородным слоем почвы мощностью от 20 до 40 см. Сформированный в результате этих мероприятий почвенный покров классифицирован как технозем гумусогенный дифференцированный. Этот тип искусственной почвы характеризовался наличием четко выраженных генетических горизонтов, благоприятными водно-физическими свойствами (оптимальная влагоемкость и водопроницаемость), а также сбалансированным агрохимическим составом, обеспечивающим стартовый запас питательных элементов для растений. Изначально такие условия можно было считать близкими к оптимальным для укоренения и последующего развития большинства видов древесно-кустарниковой растительности.

Результаты трехлетнего мониторинга полностью подтвердили высокую эффективность данного подхода к рекультивации. На секторе 1.1, где высаживались основные древесные культуры, приживаемость в варианте с применением биопрепарата к завершающему 2025 г. достигла весьма высоких показателей. Так, для сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753) этот показатель составил 66,7 %, для тополя пирамидального (*Populus nigra* L., 1753) – 71,1 %, для ивы желтокорой (*Salix caprea* L., 1753) – 47,5 %, для караганы древовидной (*Caragana arborescens* Lam., 1785) – 63,3 %, для аронии черноплодной (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott, 1821) – 37,5 %, а для барбариса Тунберга (*Berberis thunbergii* DC., 1821) – 70,0%. Аналогичная положительная динамика зафиксирована и на участке 1.2, где изучались другие кустарниковые виды: приживаемость смородины альпийской (*Ribes alpinum* L., 1753) достигла 73,3 %, шиповника сизого (*Rosa glauca* Pourr., 1788) – 75,0 %, а жимолости сизой (*Lonicera dioica* L., 1753) – 35,3 %.

Однако наиболее интересным наблюдением стало то, что в контрольных группах, где растения не обрабатывались биопрепаратом, показатели приживаемости по большинству изучаемых культур оказались статистически значимо выше. Наглядной иллюстрацией этого явления служат данные, представленные в таблице 2 – приживаемость сосны обыкновенной в контроле составила 85,3 %, что почти на 20 процентных пунктов выше, чем в варианте с биопрепаратом, а приживаемость ивы желтокорой в контроле достигла 70,0 %, что также существенно превышало показатель в 47,5 % на экспериментальном участке.

Данное наблюдение, по всей видимости, указывало на то, что в условиях благоприятного, насыщенного органикой и питательными веществами технозема гумусогенного, дополнительный стимулирующий эффект от биопрепарата нивелирован или же не проявился в полной мере на фоне изначально высокого фона естественной приживаемости. Можно предположить, что аутохтонная почвенная микробиота в таком субстрате уже была высокоактивной и конкурентоспособной, что не позволила интродуцированным штаммам из биопрепарата эффективно колонизировать ризосферу и оказать заметное положительное воздействие.

В отношении травосмесей, высеваемых методом гидропосева на секторе 1.1 и классическим ручным посевом на секторе 1.2 (табл. 3), к 2024 г. отмечено достижение 100,0 % проективного покрытия почвы как в вариантах с применением биопрепарата, так и на контрольных делянках. Это свидетельствовало о том, что травостой в конечном счете сомкнулся независимо от применяемой обработки. В самый первый год вегетации (2023 г.) наблюдалась иная картина: проективное покрытие в варианте с биопрепаратом было ниже (63,0 % для гидропосева и 58,0 % для ручного посева), чем в соответствующих контрольных группах (72,0 и 63,0 %). Это может говорить о более медленном стартовом развитии надземной массы травяного покрова под влиянием препарата. Вероятным объяснением являлось то, что биопрепарат в начальный период направлял основные ресурсы растения не на формирование вегетативных органов, а на усиленное развитие корневой системы, что является классическим механизмом действия многих ризосферных микроорганизмов. Такая стратегия, хотя и замедляла видимый рост в первый сезон, в последующие годы компенсировалось более мощной корневой системой, способной эффективнее усваивать воду и питательные вещества, что в итоге и привело к выравниванию показателей проективного покрытия ко второму году наблюдений.

Второй экспериментальный участок, включавший сектора 2.1 и 2.2, создан с применением менее затратного метода рекультивации, который заключался в отсыпке потенциально-плодородных пород мощностью от 50 до 80 см без последующего нанесения плодородного слоя почвы. Сформированный здесь почвенный покров классифицирован как технозем литогенный недифференцированный. Этот тип субстрата существенно отличался от предыдущего: он характеризовался отсутствием четкой горизонтности, более бедным питательным режимом (поскольку лишен гумусированного слоя), а также менее благоприятными водно-физическими свойствами, такими как пониженная влагоемкость и потенциальная склонность к уплотнению. Именно в этих условиях, промежуточных между оптимальными и экстремальными, влияние биопрепарата проявилось наиболее контрастно и избирательно.

На секторе 2.1 (табл. 4) приживаемость древесных культур в варианте с биопрепаратом к 2025 г. демонстрировала значительный разброс, явно указывающий на видоспецифичность эффекта. Показатели варьировали от 74,0 % у сосны обыкновенной (*P. sylvestris*) до 100,0 % у тополя пирамидального (*P. nigra*). Высокую приживаемость также показали карагана древовидная (*C. arborescens*) – 77,8 %, смородина альпийская (*R. alpinum*) – 80,8 %, арония черноплодная (*A. melanocarpa*) – 78,9 %, барбарис Тунберга (*B. thunbergii*) – 97,1 % и пузыреплодник калинолистный (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim., 1879) – 95,8 %. При этом в контрольных группах показатели по ряду культур сопоставимы или даже незначительно выше, что опять же подчеркивало сложность взаимодействия в системе «растение–микроорганизм–субстрат». Особый интерес представляла динамика аронии черноплодной: если в контроле ее приживаемость к 2025 г. снизилась до 84,2 %, то в варианте с биопрепаратом она стабилизировалась на отметке 78,9 %. Хотя абсолютный показатель в контроле остался выше, тенденция к снижению в нем при стабилизации в опыте могла косвенно указывать на положительную роль биопрепарата в смягчении стрессовых условий для данной культуры.

На секторе 2.2 (табл. 5) рассмотрим динамику жимолости сизой. В варианте с биопрепаратом ее приживаемость прогрессивно и заметно снижалась с 89,5 % в 2023 г. до 63,6 % в 2025 г. В то же время в контрольной группе снижение было менее выраженным – с 95,5 до 84,1 %.

Такая негативная динамика может говорить о недостаточной эффективности конкретных штаммов микроорганизмов, входящих в состав препарата, именно для данного вида растения в специфических условиях литогенного субстрата. Альтернативным объяснением может служить повышенная чувствительность жимолости сизой к каким-либо метаболитам интродуцированных микроорганизмов или изменение химизма ризосферы, оказавшееся для нее неблагоприятным.

Для травосмесей на втором участке также выявлена неоднозначная картина. На секторе 2.1, где применялся гидропосев, вариант с биопрепаратом показал в первый год более низкое проективное покрытие (87,0 %), по сравнению с контрольной делянкой (98,0 %). Однако к 2024 г. эти различия полностью

Таблица 2. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 1.1 участка 1 (использован гидропосев смеси трав)

Table 2. Grass (hydroseeded), trees, and shrubs in Sector 1.1, Plot 1: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Овсяница красная (*Festuca rubra* L., 1753) не менее 7 % Кострец безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, 1973) не менее 7 % Донник желтый (*Melilotus officinalis* (L.) Pall., 1776) не менее 7 % Пырей (*Elytrigia repens* (L.) Nevski, 1933) не менее 7 % Фестулолиум (× *Festulolium* Asch. & Graebn., 1902) не менее 7 % Тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L., 1753) не менее 10 % Житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn., 1770) не менее 7 % Ежа сборная (*Dactylis glomerata* L., 1753) не менее 7 % Клевер белый (*Trifolium repens* L., 1753) не менее 7 % Люпин многолетний (*Lupinus polyphyllus* Lindl., 1827) не менее 13 % Эспарцет песчаный (*Onobrychis arenaria* (Kit.) DC., 1813) не менее 7 % Вика яровая (*Vicia sativa* L., 1753) не менее 7 % Люцерна синегибридная (*Medicago sativa* L. (основной вид), 1753) не менее 7 % Основа – смесь GrowMix + мульча	Биопрепарат	500 м^2	–	–	–	63,0	100,0	100,0
	Контроль	500 м^2	–	–	–	72,0	100,0	100,0
Сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L., 1753	Биопрепарат	75 шт	53	53	50	70,7	70,7	66,7
	Контроль	75 шт	64	64	64	85,3	85,3	85,3
Тополь пирамидальный *Populus nigra* L., 1753	Биопрепарат	45 шт	34	34	32	75,6	75,6	71,1
	Контроль	45 шт	39	39	38	86,7	86,7	84,4
Ива желтокорая *Salix caprea* L., 1753	Биопрепарат	40 шт	26	20	19	65,0	50,0	47,5
	Контроль	40 шт	28	28	28	70,0	70,0	70,0
Карагана древовидная *Caragana arborescens* Lam., 1785	Биопрепарат	30 шт	20	19	19	66,7	63,3	63,3
	Контроль	30 шт	22	21	20	73,3	70,0	66,7
Арония черноплодная *Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott, 1821	Биопрепарат	40 шт	16	15	15	40,0	37,5	37,5
	Контроль	40 шт	24	24	24	60,0	60,0	60,0
Барбарис Тунберга *Berberis thunbergii* DC., 1824	Биопрепарат	60 шт	42	42	42	70,0	70,0	70,0
	Контроль	60 шт	51	51	51	85,0	85,0	85,0

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

Таблица 3. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 1.2 участка 1 (использован ручной посев смеси трав)

Table 3. Grass (manual sowing), trees, and shrubs in Sector 1.2, Plot 1: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds., 1762) не менее 23 % Клевер белый (*Trifolium repens* L., 1753) не менее 10 % Люцерна синегибридная (*Medicago sativa* L., 1753) не менее 23 % Мятлик луговой (*Poa pratensis* L., 1753) не менее 10 % Люпин многолетний (*Lupinus polyphyllus* Lindl., 1827) не менее 34 %	Биопрепарат (обработка биопрепаратом семян перед посевом)	1000 м²	–	–	–	58,0	100,0	100,0
	Контроль	1000 м²	–	–	–	63,0	100,0	100,0
Смородина альпийская *Ribes alpinum* L., 1753	Биопрепарат	15 шт	11	11	11	73,3	73,3	73,3
	Контроль	15 шт	13	13	13	86,7	86,7	86,7
Шиповник сизый *Rosa glauca* Pourr., 1788	Биопрепарат	12 шт	9	9	9	75,0	75,0	75,0
	Контроль	12 шт	11	11	11	91,7	91,7	91,7
Жимолость сизая *Lonicera dioica* L., 1753	Биопрепарат	17 шт	12	11	6	70,59	64,71	35,29
	Контроль	17 шт	13	13	11	76,47	76,47	64,71

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

Таблица 4. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 2.1 участка 2 (использован гидропосев трав)

Table 4. Grass (hydroseeded), trees, and shrubs in Sector 2.1, Plot 2: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Кострец безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, 1973), овсяница красная (*Festuca rubra* L., 1753), донник желтый (*Melilotus officinalis* (L.) Pall., 1776), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski, 1933), фестулолиум (× *Festulolium* Asch. & Graebn., 1902), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L., 1753) не менее 51 % Мятлик луговой (*Poa pratensis* L., 1753) не менее 7 % Житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn., 1770) не менее 7 % Клевер белый (*Trifolium repens* L., 1753) не менее 7 % Эспарцет песчаный (*Onobrychis arenaria* (Kit.) DC., 1813) не менее 7 % Люпин многолетний (*Lupinus polyphyllus* Lindl., 1827) не менее 7 % Вика яровая (*Vicia sativa* L., 1753) не менее 7 % Люцерна синегибридная (*Medicago sativa* L., 1753) не менее 7 % Основа – смесь GrowMix + мульча	Биопрепарат (внесение в основу)	1000 м²	–	–	–	87,0	100,0	100,0

Продолжение таблицы 4

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Кострец безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, 1973), овсяница красная (*Festuca rubra* L., 1753), донник желтый (*Melilotus officinalis* (L.) Pall., 1776), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski, 1933), фестулолиум (× *Festulolium* Asch. & Graebn., 1902), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L., 1753) не менее 51 % Мятлик луговой (*Poa pratensis* L., 1753) не менее 7 % Житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn., 1770) не менее 7 % Клевер белый (*Trifolium repens* L., 1753) не менее 7 % Эспарцет песчаный (*Onobrychis arenaria* (Kit.) DC., 1813) не менее 7 % Люпин многолетний (*Lupinus polyphyllus* Lindl., 1827) не менее 7 % Вика яровая (*Vicia sativa* L., 1753) не менее 7 % Люцерна синегибридная (*Medicago sativa* L., 1753) не менее 7 % Основа – смесь GrowMix + мульча	Контроль	1000 м^2	–	–	–	98,0	100,0	100,0
Карагана древовидная *Caragana arborescens* Lam., 1785	Биопрепарат	36 шт	31	30	28	86,1	83,3	77,8
	Контроль	36 шт	32	32	31	88,9	88,9	86,1
Смородина альпийская *Ribes alpinum* L., 1753	Биопрепарат	26 шт	24	24	21	92,3	92,3	80,8
	Контроль	26 шт	26	25	25	100,0	96,2	96,2
Сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L., 1753	Биопрепарат	73 шт	55	54	54	75,3	74,0	74,0
	Контроль	59 шт	59	54	54	100,0	91,5	91,5
Тополь пирамидальный *Populus nigra* L., 1753	Биопрепарат	24 шт	24	24	24	100,0	100,0	100,0
	Контроль	24 шт	24	24	24	100,0	100,0	100,0
Арония черноплодная *Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott, 1821	Биопрепарат	19 шт	19	15	15	100,0	78,9	78,9
	Контроль	19 шт	19	18	16	100,0	94,7	84,2
Барбарис Тунберга *Berberis thunbergii* DC., 1824	Биопрепарат	34 шт	33	33	33	97,1	97,1	97,1
	Контроль	34 шт	32	32	32	94,1	94,1	94,1
Пузыреплодник калинолистный *Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim., 1879	Биопрепарат	24 шт	24	23	23	100,0	95,8	95,8
	Контроль	24 шт	24	22	22	100,0	91,7	91,7

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

Таблица 5. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 2.2 участка 2 (использован ручной посев смеси трав)

Table 5. Grass (manual sowing), trees, and shrubs in Sector 2.2, Plot 2: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds., 1762) не менее 10 % Тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L., 1753) не менее 10 % Клевер белый (*Trifolium repens* L., 1753) не менее 50 % Люцерна синегибридная (Medicago sativa L., 1753) не менее 30 %	Биопрепарат (обработка биопрепаратом семян перед посевом)	500 м^2	–	–	–	85,0	100,0	100,0
	Контроль	500 м^2	–	–	–	81,0	100,0	100,0
Лиственница сибирская *Larix sibirica* Ledeb., 1833	Биопрепарат	60 шт	51	50	48	85,0	83,3	80,0
	Контроль	75 шт	71	70	68	94,7	93,3	90,7
Береза повислая *Betula pendula* Roth, 1788	Биопрепарат	80 шт	51	50	50	63,8	62,5	62,5
	Контроль	80 шт	64	64	63	80,0	80,0	78,8
Карагана древовидная *Caragana arborescens* Lam., 1785	Биопрепарат	22 шт	19	19	19	86,4	86,4	86,4
	Контроль	13 шт	13	13	12	100,0	100,0	92,3
Черемуха обыкновенная *Prunus padus* L., 1753	Биопрепарат	87 шт	74	73	73	85,1	83,9	83,9
	Контроль	87 шт	78	76	76	89,7	87,4	87,4
Шиповник сизый *Rosa glauca* Pourr., 1788	Биопрепарат	8 шт	7	7	7	87,5	87,5	87,5
	Контроль	8 шт	8	8	8	100,0	100,0	100,0
Смородина альпийская *Ribes alpinum* L., 1753	Биопрепарат	12 шт	12	10	10	100,0	83,3	83,3
	Контроль	12 шт	12	12	11	100,0	100,0	91,7
Жимолость сизая *Lonicera dioica* L., 1753	Биопрепарат	44 шт	38	35	28	86,4	79,5	63,6
	Контроль	44 шт	42	39	37	95,5	88,6	84,1

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

нивелировались, и покрытие достигло 100,0 % в обоих вариантах. Напротив, на секторе 2.2, где использовался ручной посев с предпосевной обработкой семян биопрепаратом, зафиксирована противоположная тенденция: стартовое проективное покрытие в опыте было немного выше (85,0 %), чем в контроле (81,0 %). Это явное расхождение свидетельствовало о высокой вариабельности эффекта биопрепарата, которая зависит не только от видового состава травостоя, но и от технологического приема посева, определяющего плотность контакта семян с препаратом и почвой.

Третий экспериментальный участок (сектора 3.1, 3.2 и 3.3) создан в наиболее суровых и экстремальных условиях – непосредственно на поверхности спланированного отвала вскрышных пород, без какого-либо дополнительного нанесения почвенных или почвообразующих материалов. Почва здесь классифицировалась как эмбриозем инициальный – самая начальная стадия почвообразования. Такой субстрат характеризовался крайне низким содержанием органического вещества и доступных форм азота, фосфора и калия, неблагоприятными физическими свойствами (часто тяжелый гранулометрический состав, склонность к заплыванию или, наоборот, каменистость), отсутствием структуры и, как следствие, недостаточной влагоемкостью. Результаты, полученные на этом участке, наиболее ярко демонстрировали реакцию растений на острый стресс, а применение биопрепарата в таких условиях показало свою наименьшую эффективность.

Показатели приживаемости древесно-кустарниковых видов в варианте с биопрепаратом здесь в среднем были существенно ниже, чем на первых двух участках, а какой-либо статистически значимый положительный эффект от его применения проявился лишь эпизодически и был крайне неустойчив. Например, на секторе 3.1 (табл. 6) приживаемость сосны обыкновенной (*P. sylvestris*) в варианте с биопрепаратом составила 66,0 %, тогда как в контроле она была равна 70,7 %. Еще более показательная разница наблюдалась у аронии черноплодной (*A. melanocarpa*): 52,9 % в опыте против 70,6 % в контроле. Аналогичная негативная для биопрепарата картина отмечена и для других культур: приживаемость караганы древовидной (*C. arborescens*) составила 87,5 % в варианте с биопрепаратом против 93,8 % в контроле, а ивы желтокорой (*S. caprea*) – 70,6 % против 82,4 % соответственно.

На секторе 3.2 (табл. 7) жимолость сизая в варианте с биопрепаратом показала катастрофически низкую приживаемость, которая к 2025 г. упала до 50,0 %, в то время как в контрольной группе этот показатель оставался на относительно высоком уровне – 83,3 %.

Наиболее критичные данные получены на секторе 3.3 (табл. 8), где в варианте с биопрепаратом к 2025 г. отмечены случаи полной гибели некоторых видов, в частности, шиповника сизого *R. glauca* (0 % сохранности), чего на контрольных делянках не наблюдалось.

Для травосмесей на третьем участке также была характерна более низкая стартовая скорость набора проективного покрытия в вариантах с биопрепаратом (76,0; 64,0 и 51,0 % на секторах 3.1, 3.2 и 3.3 соответственно), по сравнению с контролем (89,0; 75,0 и 63,0 %). Однако к 2024 г., благодаря высокой семенной продуктивности и самосеву, везде в конечном итоге достигалось 100,0 % покрытие.

Полученные на третьем участке данные позволили выдвинуть предположение, что в условиях эмбриозема инициального, где абиотические стрессы являются лимитирующим фактором, биопрепарат не только не оказывал положительного воздействия на первоначальное укоренение растений, но, вероятно, создавал дополнительную нагрузку на них в критический период адаптации. Это могло происходить по нескольким причинам: во-первых, интродуцированные микроорганизмы вступали в жесткую конкурентную борьбу с немногочисленной, но, возможно, высокоспециализированной аборигенной микробиотой за крайне ограниченные ресурсы (остатки органического вещества, влага); во-вторых, сами растения, находящиеся в состоянии сильнейшего стресса, могли не обладать достаточным энергетическим ресурсом для установления эффективного симбиоза с микроорганизмами, который всегда является энергозатратным процессом; в-третьих, не исключено, что препарат вызывал кратковременные изменения pH ризосферы или продуцировал метаболиты, которые в условиях острого дефицита других элементов питания оказывали на ослабленные растения токсическое воздействие.

Обобщая весь массив полученных за трехлетний период данных, можно с уверенностью констатировать, что эффективность применения исследуемого биопрепарата находилась в прямой и сильной зависимости от исходных почвенно-экологических условий, созданных тем или иным методом рекультивации.

Наиболее благоприятный технозем гумусогенный (участок 1), характеризующийся оптимальными агрофизическими и агрохимическими параметрами, фактически минимизировал положительный эффект от препарата. В этих условиях решающее значение для успешной приживаемости и роста растений имели традиционные факторы: качество посадочного материала, тщательность проведения посадки и последующего ухода. Применение же биопрепарата в такой ситуации не только экономически не оправдано, но в некоторых случаях может даже приводить к незначительному снижению показателей по не до конца выясненным причинам, возможно, связанным с микробной конкуренцией.

На техноземе литогенном (участок 2), представляющем собой модель промежуточных по плодородию условий, эффект биопрепарата проявился наиболее ярко, но оказался резко видоспецифичным и неоднозначным. Для одних культур, таких как тополь пирамидальный, барбарис Тунберга и пузыреплодник калинолистный, он, по всей видимости, стал стабилизирующим

Таблица 6. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 3.1 участка 3 (использован гидропосев смеси трав)

Table 6. Grass (manual sowing), trees, and shrubs in Sector 3.1, Plot 3: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L., 1753) не менее 50 % Мятлик луговой (*Poa pratensis* L., 1753) не менее 7 % Житняк гребенчатый (Agropyron cristatum (L.) Gaertn., 1770) не менее 7 % Клевер белый (*Trifolium repens* L., 1753) не менее 7 % Эспарцет песчаный (*Onobrychis arenaria* (Kit.) DC., 1813) не менее 7 % Люпин многолетний (*Lupinus polyphyllus* Lindl., 1827) не менее 7 % Вика яровая (*Vicia sativa* L., 1753) не менее 7 % Люцерна синегибридная (*Medicago sativa* L., 1753) не менее 7 % Основа – смесь GrowMix + мульча	Биопрепарат (внесение в основу)	1000 м^2	–	–	–	76,0	100,0	100,0
	Контроль	1000 м^2	–	–	–	89,0	100,0	100,0
Сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L., 1753	Биопрепарат	50 шт	33	33	33	66,0	66,0	66,0
	Контроль	75 шт	53	53	53	70,7	70,7	70,7
Тополь пирамидальный *Populus nigra* L., 1753	Биопрепарат	23 шт	18	17	17	78,3	73,9	73,9
	Контроль	23 шт	20	18	18	87,0	78,3	78,3
Карагана древовидная *Caragana arborescens* Lam., 1785	Биопрепарат	32 шт	28	28	28	87,5	87,5	87,5
	Контроль	32 шт	30	30	30	93,8	93,8	93,8
Ива желтокорая *Salix caprea* L., 1753	Биопрепарат	34 шт	26	24	24	76,5	70,6	70,6
	Контроль	34 шт	29	29	28	85,3	85,3	82,4
Арония черноплодная *Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott, 1821	Биопрепарат	17 шт	9	9	9	52,9	52,9	52,9
	Контроль	17 шт	12	12	12	70,6	70,6	70,6
Барбарис Тунберга *Berberis thunbergii* DC., 1824	Биопрепарат	37 шт	25	25	25	67,6	67,6	67,6
	Контроль	37 шт	31	31	31	83,8	83,8	83,8
Смородина альпийская *Ribes alpinum* L., 1753	Биопрепарат	5 шт	4	4	4	80,0	80,0	80,0
	Контроль	5 шт	5	5	4	100,0	100,0	80,0
Жимолость сизая *Lonicera dioica* L., 1753	Биопрепарат	5 шт	4	4	4	80,0	80,0	80,0
	Контроль	5 шт	5	5	4	100,0	100,0	80,0

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

Таблица 7. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 3.2 участка 3 (использован ручной посев травосмеси)

Table 7. Grass (manual sowing), trees, and shrubs in Sector 3.2, Plot 3: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds., 1762) не менее 10 % Тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L., 1753) не менее 10 % Клевер белый (*Trifolium repens* L., 1753) не менее 10 % Люцерна синегибридная (*Medicago sativa* L., 1753) не менее 10 % Солянка Комарова (*Salsola komarovii* Iljin, 1936) не менее 10 %	Биопрепарат (обработка биопрепаратом семян перед посевом)	1000 м^2	–	–	–	64,0	100,0	100,0
	Контроль	1000 м^2	–	–	–	75,0	100,0	100,0
Лиственница сибирская *Larix sibirica* Ledeb., 1833	Биопрепарат	65 шт	49	49	49	75,4	75,4	75,4
	Контроль	65 шт	58	58	58	89,2	89,2	89,2
Береза повислая *Betula pendula* Roth, 1788	Биопрепарат	91 шт	52	49	48	57,1	53,8	52,7
	Контроль	91 шт	54	50	50	59,3	54,9	54,9
Карагана древовидная *Caragana arborescens* Lam., 1785	Биопрепарат	23 шт	19	19	19	82,6	82,6	82,6
	Контроль	23 шт	21	21	21	91,3	91,3	91,3
Черемуха обыкновенная *Prunus padus* L., 1753	Биопрепарат	13 шт	11	11	9	84,6	84,6	69,2
	Контроль	13 шт	13	12	12	100,0	92,3	92,3
Смородина альпийская *Ribes alpinum* L., 1753	Биопрепарат	8 шт	6	6	5	75,0	75,0	62,5
	Контроль	8 шт	8	7	7	100,0	87,5	87,5
Жимолость сизая *Lonicera dioica* L., 1753	Биопрепарат	6 шт	3	3	3	50,0	50,0	50,0
	Контроль	6 шт	5	5	5	83,3	83,3	83,3
Шиповник сизый *Rosa glauca* Pourr., 1788	Биопрепарат	8 шт	6	4	4	75,0	50,0	50,0
	Контроль	8 шт	8	8	8	100,0	100,0	100,0

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

Таблица 8. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 3.3 участка 3 (использован ручной посев травосмеси)

Table 8. Grass (manual sowing), trees, and shrubs in Sector 3.3, Plot 3: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Эспарцет песчаный (*Onobrychis arenaria* (Kit.) DC., 1813) не менее 70 % Мятлик луговой (*Poa pratensis* L., 1753) не менее 15 % Донник желтый (*Melilotus officinalis* (L.) Pall., 1776) не менее 10 % Щавель конский (*Rumex confertus* Willd., 1809) не менее 5 %	Биопрепарат (обработка биопрепаратом семян перед посевом)	1000 м^2	–	–	–	51,0	100,0	100,0
	Контроль	1000 м^2	–	–	–	63,0	100,0	100,0
Лиственница сибирская *Larix sibirica* Ledeb., 1833	Биопрепарат	52 шт	45	45	44	86,5	86,5	84,6
	Контроль	75 шт	73	71	71	97,3	94,7	94,7
Береза повислая *Betula pendula* Roth, 1788	Биопрепарат	78 шт	32	29	29	41,0	37,2	37,2
	Контроль	78 шт	46	46	46	59,0	59,0	59,0
Сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L., 1753	Биопрепарат	26 шт	23	23	23	88,5	88,5	88,5
	Контроль	52 шт	48	48	48	92,3	92,3	92,3
Пузыреплодник калинолистный *Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim., 1879	Биопрепарат	13 шт	10	10	10	76,9	76,9	76,9
	Контроль	13 шт	12	12	12	92,3	92,3	92,3
Вяз мелколистный *Ulmus parvifolia* Jacq., 1798	Биопрепарат	8 шт	6	6	6	75,0	75,0	75,0
	Контроль	12 шт	10	10	9	83,3	83,3	75,0
Шиповник сизый *Rosa glauca* Pourr., 1788	Биопрепарат	3 шт	2	2	0	66,7	66,7	0
	Контроль	4 шт	3	2	2	75,0	50,0	50,0
Жимолость сизая *Lonicera dioica* L., 1753	Биопрепарат	3 шт	2	1	1	66,7	33,3	33,3
	Контроль	3 шт	2	2	2	66,7	66,7	66,7
Смородина альпийская *Ribes alpinum* L., 1753	Биопрепарат	3 шт	2	2	2	66,7	66,7	66,7
	Контроль	3 шт	3	3	3	100,0	100,0	100,0

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

фактором, способствуя высокой и стабильной приживаемости. Для других, в частности, для жимолости сизой и, отчасти, аронии черноплодной, его влияние было нейтральным или откровенно негативным в долгосрочной перспективе. Это полностью согласовывалось с общебиологическими данными, что эффективность микробных инокулянтов сильно зависит от конкретного растения-хозяина и его генетически обусловленной симбиотической специфичности. Не все растения одинаково готовы к сотрудничеству с одними и теми же штаммами микроорганизмов.

Наименее эффективным, а в большинстве случаев и негативным, применение биопрепарата оказалось в наиболее суровых условиях эмбриозема инициального (участок 3). Здесь совокупность абиотических стрессов, таких как острый дефицит основных питательных веществ, недостаточная влагоемкость субстрата и нестабильный температурный режим, была настолько сильна, что потенциальный положительный эффект от микробного препарата не мог быть реализован в принципе. Более того, в таких экстремальных условиях интродуцированные микроорганизмы, сами находящиеся в стрессе, могли вступать в обостренную конкуренцию как с аборигенной микробиотой, так и непосредственно с растениями за критически ограниченные ресурсы, прежде всего за влагу и легкодоступный углерод, тем самым усугубляя и без того тяжелое состояние фитоценоза.

Таким образом, полученные данные позволяют сделать фундаментальный вывод, что применение биопрепаратов для рекультивации нарушенных земель не должно рассматриваться как универсальное или самостоятельное решение. Их следует рассматривать исключительно как один из элементов комплексной адаптивной технологии, эффективность которого жестко детерминирована двумя ключевыми факторами: типом формируемого почвенного субстрата и конкретным видовым составом высаживаемых растений. Наилучшие перспективы для использования подобных биопрепаратов связаны именно с промежуточными условиями по плодородию, какими и являются техноземы литогенные. В таких ситуациях он может выступать в роли важного стабилизирующего фактора, нивелирующего часть стрессовых воздействий для восприимчивых к нему видов. В благоприятных же условиях его применение экономически нецелесообразно, а в крайне неблагоприятных – требует не простого внесения, а глубокой предварительной научно обоснованной адаптации самого препарата к специфике эмбриоземов, например, через селекцию особо толерантных штаммов, либо его сочетания с другими, более мощными мерами по мелиорации (внесение органических удобрений, мелиорантов, структурообразователей) субстрата.

Дальнейшие исследовательские изыскания в этом направлении должны быть сфокусированы на целенаправленном подборе специфических штаммов микроорганизмов, проявляющих высокую толерантность к условиям конкретных техногенных субстратов (высокий pH, наличие тяжелых металлов, дефицит органики), и на углубленном изучении их взаимодействия не только с растениями, но и с комплексом аборигенной почвенной микробиоты. Только такой системный подход позволит создать следующее поколение высокоэффективных и узкоспециализированных биопрепаратов для рекультивации.

Выводы

На основе проведенного трехлетнего исследования по рекультивации техногенно нарушенных территорий угольного разреза можно сделать следующие выводы.

Эффективность применения биопрепарата на основе штаммов микроорганизмов продемонстрировала сильную зависимость от типа формируемого почвенного субстрата и видового состава высаживаемых растений. На участке с наиболее благоприятными условиями – техноземом гумусогенным дифференцированным, созданным послойным нанесением плодородного и потенциально-плодородного слоев, – биопрепарат не оказал значимого положительного влияния на приживаемость древесно-кустарниковых видов. Более того, в ряде случаев показатели приживаемости в контрольных группах были выше, что, вероятно, связано с высокой естественной микробиологической активностью субстрата и конкуренцией с интродуцированными штаммами.

На участке с техноземом литогенным недифференцированным, где плодородный слой отсутствовал, действие биопрепарата проявилось наиболее контрастно и избирательно. Для таких культур, как тополь пирамидальный (*Populus nigra* L., 1753), барбарис Тунберга (*Berberis thunbergii* DC., 1824) и пузыреплодник калинолистный (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim., 1879), отмечена стабильно высокая приживаемость, тогда как для других видов, например жимолости сизой (*Lonicera dioica* L., 1753), влияние препарата было нейтральным или даже отрицательным. Это подчеркивало видоспецифичность взаимодействия между растениями и микробным консорциумом. В наиболее экстремальных условиях эмбриозема инициального, сформированного на отвале вскрышных пород, применение биопрепарата не только не способствовало улучшению приживаемости, но в ряде случаев усугубляло стресс растений. Высокая конкуренция за ограниченные ресурсы между интродуцированными микроорганизмами и аборигенной микробиотой, а также энергетическая затратность симбиоза для ослабленных растений, вероятно, стали основными причинами низкой эффективности препарата в таких условиях.

Таким образом, использование биопрепаратов для рекультивации не является универсальным решением и должно применяться избирательно. Наилучшие

результаты достигаются в условиях техноземов литогенных, где препарат может выступать стабилизирующим фактором. В благоприятных условиях его применение нецелесообразно, а в экстремальных – требует дополнительной адаптации штаммов или сочетания с другими мерами мелиорации. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку специализированных микробных комплексов, толерантных к специфике техногенных субстратов.

Критерии авторства

Авторы заявляют о равнозначном вкладе в подготовку и написание статьи.

Конфликт интересов

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

Contribution

The authors contributed equally to the research and bear equal responsibility for any potential plagiarism.

Conflict of interest

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

References / Список литературы

1. Степанюк Г. Я., Заушинцена А. В., Буренков С. С., Свиркова С. В., Гаврилов А. А. и др. Оценка развития растительности техногенного отвала. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 4. С. 807–818. [Stepanyuk GYa, Zaushintsena AV, Burenkov SS, Svirkova SV, Gavrilov AA, *et al.* Evaluating the vegetation development of coal-mine dumps. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(4):807–818. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2407

2. Asyakina LK, Vorob'eva EE, Proskuryakova LA, Zharko MYu. Evaluating extremophilic microorganisms in industrial regions. Foods and Raw Materials. 2023;11(1):162–171. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-556

3. Осинцева М. А., Дюкова Е. А., Ульянова Е. Г., Осинцев А. М. Изучение способности аккумулирования тяжелых металлов растениями в процессе рекультивации отвала угольного разреза. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 4. С. 897–908. [Osintseva MA, Dyukova EA, Ulyanova EG, Osintsev AM. Heavy metals accumulation in plants during coal mine reclamation. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(4):897–908. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2551

4. Hu J, Zhu S, Yang K, Ren Y, Zhang Z, *et al*. Effects of different reclaimed mine land use patterns on the soil properties and water infiltration of opencast coal mines in the northern Loess Plateau, China. Catena. 2024;243:108193. https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108193

5. Čížková B, Woš B, Pietrzykowski M, Frouz J. Development of soil chemical and microbial properties in reclaimed and unreclaimed grasslands in heaps after opencast lignite mining. Ecological Engineering. 2018;123:103–111. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.09.004

6. Pratiwi, Narendra BH, Siregar CA, Turjaman M, Hidayat A, *et al*. Managing and reforesting degraded post-mining landscape in Indonesia: A Review. Land. 2021;10(6):658. https://doi.org/10.3390/land10060658

7. Tu C, Wei J, Guan F, Liu Y, Sun Y, *et al*. Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil. Environment International. 2020;137:105576. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105576

8. Prach K, Pyšek P. Using spontaneous succession for restoration of human-disturbed habitats: Experience from Central Europe. Ecological Engineering. 2001;17(1):55–62. https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00132-4

9. Visconti D, Álvarez-Robles MJ, Fiorentino N, Fagnano M, Clemente R. Use of *Brassica juncea* and *Dactylis glomerata* for the phytostabilization of mine soils amended with compost or biochar. Chemosphere. 2020;260:127661. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127661

10. Guo J, Zhang Y, Huang H, Yang F. Deciphering soil bacterial community structure in subsidence area caused by underground coal mining in arid and semiarid area. Applied Soil Ecology. 2021;163:103916. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103916

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Осинцева Мария Алексеевна / Maria A. Osintseva ORCID 0000-0002-4045-8054; eLIBRARY SPIN 8266-5409
Жидкова Елена Анатольевна / Elena A. Zhidkova ORCID 0000-0002-7658-0254; eLIBRARY SPIN 5805-7999

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2615
https://elibrary.ru/KZNVUC

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

Cytotoxic, Antioxidant, and Antibacterial Properties of Eastern Baltic Plant Extracts

Stanislav A. Sukhikh[1,*], Svetlana A. Ivanova[2], Alina Kh. Bakhtiyarova[1], Stanislav E. Pshenichnikov[1], Kateryna V. Levada[1], Olga O. Babich[1]

[1] *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

[2] *Kemerovo State University, Kemerovo, Russia*

Received: 06.10.2025
Revised: 03.11.2025
Accepted: 11.11.2025

**e-mail: stas-asp@mail.ru*

© S.A. Sukhikh, S.A. Ivanova, A.Kh. Bakhtiyarova, S.E. Pshenichnikov, K.V. Levada, O.O. Babich, 2025

Abstract.
Plant extracts are a source of new drugs and alternative therapies. This article describes the antioxidant and antibacterial properties of aqueous methanol extracts of Eastern Baltic *Glycyrrhiza glabra* L., *Salix alba* L., and *Echium vulgare* L., as well as their effects on the viability of human blood cells.

The aerial parts of the plants were harvested in the Kaliningrad Region, Russia. The phytochemical composition of their plant extracts was studied by the method of high-performance liquid chromatography (HPLC). The bioactive profile and antibacterial action were described using the methods of spectrophotometry and disk diffusion, respectively. Cytotoxicity of extracts was studied by WST-1 colorimetric analysis.

The extracts proved to contain phenolic compounds. The antioxidant activity of the *S. alba* extracts was four times higher than that of *G. glabra* and more than seven times higher than that of *E. vulgare*. The *G. glabra* extracts were active against both Gram-positive and Gram-negative bacteria while the *E. vulgare* extract samples inhibited Gram-negative bacteria only. As for cytotoxicity, *S. alba* and *E. vulgare* were able to reduce the viability of human T-lymphoblastic leukemia (Jurkat) cells and human blood mononuclear cells.

The extracts of *G. glabra*, *S. alba*, and *E. vulgare* demonstrated good prospects for biomedicine. Further detailed research may result in their eventual introduction into official medicine as potent therapeutic and preventive agents.

Keywords. Plants, *Glycyrrhiza glabra*, *Salix alba*, *Echium vulgare*, aqueous methanol extract, free radicals

Funding. The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2025-675, ext. No. 13.2251.21.0299, August 20, 2025): Functional foods with combined antioxidant and anti-aging effects.

For citation: Sukhikh SA, Ivanova SA, Bakhtiyarova AKh, Pshenichnikov SE, Levada KV, *et al.* Cytotoxic, Antioxidant, and Antibacterial Properties of Eastern Baltic Plant Extracts. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4): 903–917. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2615

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2615
https://elibrary.ru/KZNVUC

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Цитотоксические, антиоксидантные и антибактериальные свойства экстрактов растений Восточной Прибалтики

С. А. Сухих[1,*], С. А. Иванова[2], А. Х. Бахтиярова[1], С. Е. Пшеничников[1], Е. В. Левада[1], О. О. Бабич[1]

[1] *Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия*

[2] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

Поступила в редакцию: 06.10.2025
Принята после рецензирования: 03.11.2025
Принята к публикации: 11.11.2025

**e-mail: stas-asp@mail.ru*

© С. А. Сухих, С. А. Иванова, А. Х. Бахтиярова, С. Е. Пшеничников, Е. В. Левада, О. О. Бабич, 2025

Аннотация.
Растительные экстракты являются перспективным источником новых лекарственных средств и альтернативных методов лечения. Цель данного исследования – изучить антиоксидантные и антибактериальные свойства водно-спиртовых экстрактов восточно-балтийских растений, а также их влияние на клетки крови человека.
Наземные части солодки голой (*Glycyrrhiza glabra* L.), ивы белой (*Salix alba* L.), и синяка обыкновенного (*Echium vulgare* L.) собраны в Калининградской области (Россия). Фитохимический состав растительных экстрактов, полученных из данного растительного материала, изучался методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Биологическая активность и антибактериальное действие описывались методами спектрофотометрии и диско-диффузии соответственно. Цитотоксичность экстрактов изучена с помощью колориметрического анализа WST-1.
Доказано наличие в экстрактах фенольных соединений. Антиоксидантная активность экстрактов *S. alba* оказалась в четыре раза выше, чем у *G. glabra*, и более чем в семь раз превышала антиоксидантную активность экстрактов *E. vulgare*. Экстракты *G. glabra* подавляли рост как грамположительных, так и грамотрицательных бактерий, а образцы экстракта *E. vulgare* оказались эффективны только в отношении грамотрицательных бактерий. *S. alba* и *E. vulgare* оказались способны снижать жизнеспособность клеток Т-лимфобластного лейкоза человека (Jurkat) и мононуклеарных клеток крови.
Экстракты *G. glabra*, *S. Alba*, и *E. vulgare* могут быть рекомендованы к использованию в области биомедицины. Требуется более подробное изучение для внедрения их в официальную медицину в качестве терапевтических и профилактических средств.

Ключевые слова. Растения, *Glycyrrhiza glabra*, *Salix alba*, *Echium vulgare*, водно-спиртовых экстрактов, свободные радикалы

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-675, доб. № 13.2251.21.0299 от 20 августа 2025 г.): Функциональные продукты питания с комбинированным антиоксидантным и омолаживающим действием.

Для цитирования: Сухих С. А., Иванова С. А., Бахтиярова А. Х., Пшеничников С. Е., Левада Е. В. и др. Цитотоксические, антиоксидантные и антибактериальные свойства экстрактов растений Восточной Прибалтики. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 903–917. (На англ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2615

Introduction

Medicinal plants that contain phenolic compounds, flavonoids, and phenol glycosides demonstrate great prospects as anticancer pharmaceuticals [1]. Studies that involve medicinal plant extracts cast light upon the effect of these beneficial substances on human cells [1].

Some medicinal plant extracts are known to contain chemical compounds able to permeate cell membranes and cause their apoptosis or necrosis. Insoluble nano- and microparticles may damage cell membranes or individual cellular compartments. High dilution factors may protect concentrated solutions from the possible effects of pH changes in the nutrient medium. However, some highly reactive solution components interact with organic compounds, even at low concentrations [2].

Human blood mononuclear cells are a population of immune cells. They are used to study cytotoxicity and biocompatibility of nanomaterials and soluble substances. Together with immortalized human T-lymphocyte cell line called Jurkat cells, mononuclear cells can be used to compare the cytotoxic effects of different agents on healthy and tumor blood cells [3]. Chemical exposure

tests make it possible to reveal the biocompatibility of blood mononuclear cells at different concentrations before introducing them into the blood stream [4].

Blood mononuclear cells are easy to isolate from peripheral blood, which makes them convenient for laboratory experiments. Due to their high sensitivity to chemicals, they can be used to detect such adverse effects as toxicity and inflammation [5].

In-vitro studies allow scientists to control the experimental parameters and focus on specific effects of different agents. The results can be extrapolated to other areas of medical research [6]. In addition, studies on the immunomodulatory effects of plant materials and extracts provide an insight into the interactome, yielding novel, and safe therapeutic approaches.

Screening plant extracts on mononuclear cells is important for several reasons. Many plants contain bioactive compounds, such as flavonoids, polyphenols, and alkaloids. These compounds have antioxidant, anti-inflammatory, and immunostimulant properties [7]. Understanding how these compounds interact with blood cells could lead to the development of new preventive and therapeutic natural drugs [8].

Plant extracts establish new biological therapies of immune diseases and cancer by affecting cell signaling pathways and modulating the immune response [9]. These interactions elucidate the potential benefits of herbal components and help to predict side effects of herbal medicines, thus adjusting them to modern safety standards.

Phytochemical screening reveals the effect of qualitative and quantitative profile of plant extracts on the survival of blood mononuclear cells. It casts light upon the mechanisms behind the cytotoxic effects of some medicinal plants [8].

Glycyrrhiza glabra L., commonly known as licorice, belongs to the legume family and is ubiquitous in Asia and Europe. It grows in abundance in the Kaliningrad Region, one of Russia's Baltic regions. *G. glabra* is used to treat throat infections, cardiovascular diseases, tuberculosis, and respiratory diseases. It has reliable antibacterial, anti-inflammatory, immunomodulatory, anticancer, hepatoprotective, anti-asthmatic, and antidiabetic activities [10]. These effects are due to such flavonoids as isoliquiritigenin, liquiritigenin, lichalocone, and glabridin, as well as to coumarins, chalcones, isoflavones, phenolic compounds, and triterpenoid saponins [11].

Salix alba L., or white willow, is a tree that grows 5–8 meters tall. Its thin, hanging branches form a characteristic dome top. It is native to Europe and is quite widespread in the Kaliningrad Region. *S. alba* contains such flavonoids as luteolin, apigenin, and quercetin. Other biologically active substances include phenoglycosides, tannins, phenolic acids, ascorbic acid, amino acids, saponins, essential oils, and polysaccharides. These substances may contribute to anti-ulcer, antioxidant, and anti-inflammatory effects [12].

Echium vulgare L., also known as viper's bugloss or blueweed, is native to Europe and the Kaliningrad Region. Some pharmacological studies confirmed its early ethnomedicinal properties *in vitro* and *in vivo*: *E. vulgare* extracts have antioxidant, analgesic, anxiolytic, anti-inflammatory, antibacterial, and antiviral effects. It contains naphthoquinones, flavonoids, terpenoids, and polyphenols [13, 14].

The bioactive profile of plants directly depends on the geobotanical environment [1]. In this respect, *G. glabra*, *S. alba,* and *E. vulgare* harvested in the Kaliningrad Region and the Eastern Baltic may have a bioactive profile different from that of the same plants harvested elsewhere. Herbal medicine is effective, low-toxic, and safe. Plant preparations are highly reliable as part of preventive treatment or against chronic and slowly developing diseases. Healthy people can also use them to improve their quality of life.

This study tested the antioxidant and antibacterial effects of extracts of Eastern Baltic *G. glabra, S. alba,* and *E. vulgare* on the viability of healthy and tumor human blood cell lines.

Eventually, official medicine may introduce these plants into clinical practice. As a source of new drug substances, they expand the possibilities of pharmacology and offer alternative therapeutic approaches. Ultimately, studies on the effects of plant extracts on mononuclear cells contribute to the integration of plant-based medicines into modern medical practices [15, 16].

Study objects and methods

Extract preparation. The study featured extracts of *Glycyrrhiza glabra* L., *Salix alba* L., and *Echium vulgare* L. The plants were harvested in the Kaliningrad Region, Eastern Baltic, Northwestern Federal District of Russia, in July and August 2023. *G. glabra*, *S. alba*, and *E. vulgare* are not on any national or local list of rare wild plants, which means they are permitted for harvesting in the Russia. The species identification was obtained from the Herbarium of the Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia (protocol No. 16/2023).

The extracts included aerial parts, i.e., leaves and stems. The aqueous methanol extracts provided a complete coverage of the secondary metabolome. Methanol extracts polyphenols and saponins, which have reliable therapeutic effects [17–20]. Methanol was added to a suspension of dry plant material in a weight-to-volume ratio of 1:20. After a one-minute vortexing (Pushchinskie Laboratorii, Russia), the extract was ultrasonicated in a UG-2060 ultrasonic bath (PiterLab, Russia) at room temperature for 15 min. After separating the precipitate on a centrifuge (Pushchinskie Laboratorii, Russia), the extracts were poured into separate flasks. The extraction involved a water-methanol mix at a methanol-to-water ratio of 80:20, v/v. As for the extractant, the ratio was 1:20 weight-to-volume. Then, we mixed the extract samples obtained in the first and second steps to remove

the solvent under reduced pressure in a Rotavapor R-300 vacuum rotary evaporator (Buchi Labortechnik AG, Switzerland) and a freeze-drying system (Labconco, USA) [21, 22].

Total yield of *G. glabra*, *S. alba*, and *E. vulgare* extracts. In line with the gravimetric method, we concentrated the extract samples using a Rotavapor R-300 vacuum rotary evaporator (Buchi Labortechnik AG, Switzerland) [22] and dried them in a Labconco Triad freeze dryer (Labconco, USA).

Phytochemical profiling of *G. glabra*, *S. alba*, and *E. vulgare* extracts. The method of high-performance liquid chromatography (HPLC) made it possible to study the content of secondary metabolites of phenolic nature in the obtained extracts. The experiment involved an LC-20AB Shimadzu Prominence chromatograph (Shimadzu, Japan) equipped with a binary pump, an SPD-M20A diode matrix detector, and a Zorbax 300SB-C18 4.6×250 mm 5 μm column (Agilent, USA). The separation had the following parameters: gradient elution mode, 40°C; mobile phase: eluent A – 0.1% tetrahydrofuran in double-distilled water; eluent B – acetonitrile; flow rate – 1 mL/min, analytical wavelengths – 254, 280, and 325 nm [22].

The components were identified by the retention times and the spectra of individual standard substances: 3,4-dihydroxybenzoic acid, 2,5-dihydroxybenzoic acid, hyperoside, gallic acid, apigenin-7-O-glucoside (cosmosiin), catechin, astragalin, ferulic acid, caffeic acid, chlorogenic acid, neochlorogenic acid, acacetin, quercetin-3D-glucoside, ellagic acid, rutin, luteolin-7-glucoside (cynaroside), p-coumaric acid, caftaric acid, rosmarinic acid, chicoric acid, oenothein B, genistein, daidzein, formononetin, and morin (Massmedika, Russia). The concentrations of these compounds were calculated using calibration equations (3–5% error).

The results were summarized to specific values and calculated per dry weight of plant raw material.

Cell cultivation. All cell-related experiments were conducted under sterile conditions using a BMB-II-Laminar-S-1.5 system (Neoteric, Russia) in line with standard research methods [23]. A New Brunswick Galaxy 170 S incubator (Eppendorf, Germany) provided the following stable conditions: 37°C, 5% CO_2. To monitor the cell morphology, we used an inverted CKX53 light microscope (Olympus, Japan). A Countess II FL automated cell counter provided reliable cell count and viability data (Thermo Fisher Scientific, Singapore). To assess the cell viability, we stained the cells with 0.4% trypan blue stain (Invitrogen, USA). For this purpose, we mixed 10 μL cell suspension with 10 μL trypan blue solution before transferring the resulting mix to its well on the disposable cell counter slide (Invitrogen, USA). The measurement procedure followed the manufacturer's protocols [24, 25].

To culture human T-lymphoblastic leukemia (Jurkat) cells and human blood mononuclear cells, we used an RPMI-1640 nutrient medium (Gibco, UK), supplemented with 10% fetal bovine serum (Gibco, USA) and 1% antibiotic solution (penicillin and streptomycin, Gibco, USA). The Jurkat cells underwent three passages. The blood mononuclear cells were isolated immediately before the experiment according to the protocol described below.

Human blood mononuclear cell isolation. To obtain cellular material, blood was collected using vacuum systems for blood collection (Grener Bio-One, Austria) from the elbow vein of healthy donors (permission No. 5, May 16, 2016, Ethics Committee, Fabrika Innovation Park, Immanuel Kant Baltic Federal University). The heparinized blood samples were mixed with a cold solution (4°C) of phosphate-buffered saline (Sigma-Aldrich, USA) at a 1:1 ratio. This mix was then layered on a 3:1 Ficoll solution (Ficoll Paque Premium, p = 1.077, Sigma-Aldrich, USA) in a 50 mL tube. The centrifugation was conducted in an 5702 centrifuge (Eppendorf, Germany) at 1,500 rpm at room temperature for 40 min. The resulting gradient ring was pipetted and mixed with nutrient medium. After that, we were able to assess the cell viability and total cellularity.

Cell viability analysis by the WST-1 method. To investigate the cytotoxic effect of the extracts, we used the WST-1 colorimetric assay (Roche Diagnostics GmbH, Germany). The method relies on the ability of viable cells to cleave cell dye molecules in water-soluble tetrazolium salt 1 to form formazan salts. This process presupposes staining with subsequent spectrophotometry. This procedure allowed us to count live cells. For this purpose, we seeded freshly isolated blood mononuclear cells and Jurkat cells at 50,000 cells per well (Fig. 1). The nutrient medium contained cells and extracts at concentrations of 10, 50, and 100 μg/mL in the experimental wells (E10, E50, E100, Fig. 1). The control wells contained no extracts. Calibration wells: C0, C10, C50, C100 (Fig. 1) contained extracts in the same concentrations as in the experimental wells but no actual cells. The plates spent 24 h in an incubator.

After 24 h of cultivation, we added 10 μL of warm (37°C) WST-1 dye to each well and mixed thoroughly. The plate spent 45 min in the incubator. Then, we measured the optical density of the cell suspensions in the wells with a Multiskan FC microplate photometer (Thermofisher, Germany) and a 450 nm optical filter. Each experimental group underwent a minimum of 12 repetitions. The obtained values were standardized to the average optical density in the control wells. The optical density values of the calibration wells were subtracted from the optical density values of the experimental wells with the same concentrations. The statistical processing and graphing relied on the GraphPad Prism 7.04 software (Graph Pad Software Inc., USA).

Aliquoting the extract solutions. The initial mass of the extract diluted in 50 mL 5% dimethyl sulfoxide water solution was 3.07 g, and the initial concentration

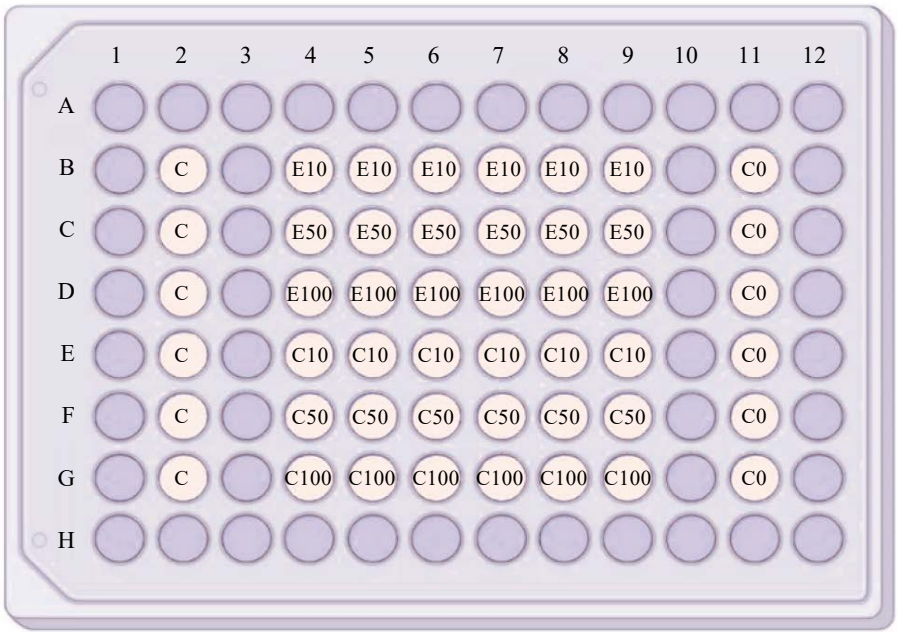


Figure 1. Cytotoxic effect of plant extracts on human blood mononuclear cells and Jurkat cells: C – control wells; E10, E50, E100 – experimental wells with solutions of extracts at concentrations of 10, 50, and 100 μg/mL, respectively; C0 – calibration wells without extract; C10, C50, C100 – calibration wells with extract solutions at concentrations of 10, 50, and 100 μg/mL, respectively

Рисунок 1. Цитотоксическое воздействие растительных экстрактов на мононуклеарные клетки крови человека и клетки линии Jurkat: C – контрольные лунки; E10, E50, E100 – экспериментальные лунки с растворами экстрактов в концентрациях 10, 50 и 100 мкг/мл соответственно; C0 – калибровочные лунки без экстракта; C10, C50, C100 – калибровочные лунки с растворами экстрактов в концентрациях 10, 50 и 100 мкг/мл соответственно

was 61.46 mg/mL. The concentrations of the stock solutions were obtained as follows:

$$C = \frac{1.000 \times m}{50} \quad (1)$$

where C is the concentration of the initial extract solution, mg/mL, and m is the mass of the initial extract solution, mg.

The dilution of the stock solutions into 1 mg/mL working solutions consisted of several steps. The plant extract solution was diluted with sterile distilled water at a ratio of 1:5, respectively, until the solution reached a concentration of 10.24 mg/mL. After that, the resulting solution was diluted with RPMI-1640 nutrient medium (Sigma-Aldrich, USA) at a ratio of 1:9 until 1.02 mg/mL.

The resulting working solutions were further diluted with RPMI-1640 nutrient medium (Sigma-Aldrich, USA) to working concentrations of 200 and 100 μg/mL as 1:4 and 1:9, respectively. The working solution with a concentration of 20 μg/mL was prepared by diluting the solution with a concentration of 200 μg/mL with RPMI-1640 nutrient medium (Sigma-Aldrich, USA) at a ratio of 1:9, respectively.

Antioxidant properties of *G. glabra*, *S. alba*, and *E. vulgare* extracts. To study the antioxidant activity of the extract samples, we appealed to spectrophotometric methods, i.e., ABTS (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), FRAP (ferric reducing antioxidant power), and DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl). A series of standard solutions of Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid) served as standard. The results were expressed as milligrams of Trolox equivalent per gram of dry weight (mg/g).

The FRAP reagent consisted of 0.3 M acetate buffer solution at pH 3.6, 10 mM 2,4,6-tripyridyl-s-triazine solution in 40 mM HCl, and 20 mM $FeCl_3 \times 6H_2O$ solution at a ratio of 10:1:1. To implement the FRAP method, we mixed 20 μL extract and 300 μL reagent in a 96-well plate (Eppendorf, Germany). The resulting mix was incubated in a TS 1/20 SPU dry-air thermostat (Smolenskoye SKTB SPU, Russia) at 37°C for 10 min. The optical density test involved a CLARIOstar microplate reader (BMG Labtech, Germany) at 593 nm.

To implement the ABTS method, we mixed 20 μL extract and 300 μL $ABTS^{-+}$ cation radical solution in a 96-well plate (Eppendorf, Germany). Then, we studied the reaction progress by measuring the changes in optical density with a CLARIOstar microplate reader (BMG Labtech, Germany) at 734 nm.

The $ABTS^{-+}$ cation radical solution consisted of the ABTS reagent (Sigma-Aldrich, USA) mixed with a 2.45 mM potassium persulfate solution (Sigma-Aldrich, USA). It was incubated in the dark at room temperature for 16 h.

As part of the DPPH method, we added 20 μL extract and 300 μL of a fresh 0.1 mM solution of 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl to a 96-well plate (Eppendorf, Germany). To study the reaction progress, we measured the change in the optical density with a CLARIOstar microplate reader (BMG Labtech, Germany) at 515 nm.

Antibacterial properties of *G. glabra*, *S. alba*, and *E. vulgare* extracts. The antibacterial profile was obtained by the disk diffusion method, which involved strains of *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, and *Candida albicans* (Kurchatov Institute, Russia).

The test strains of *P. aeruginosa*, *E. coli*, and *B. subtilis* grew on a dense Lysogeny broth nutrient medium (Biocomma, China) in an LSI-3016A Shaking Incubator thermostat (Daihan Labtech, South Korea). The cultivation involved stationary conditions at 37°C [26]. The test strain *C. albicans* grew on Sabouraud agar (Sigma-Aldrich, USA) under stationary conditions at 25°C [26].

As part of the disk diffusion method, the test strains were sown as a lawn on an agar nutrient medium at a bacterial suspension concentration of 1.5×10^8 CFU/mL. After that, we placed 5-mm-diameter paper disks soaked in 10 μL extracts on the lawn. A 5-mm-diameter disk impregnated with 10 μL of appropriate solvent served as negative control. The disks impregnated with kanamycin (for the bacteria) or fluconazole (for *C. albicans*) served as positive controls. The concentrations of kanamycin and fluconazole were 100 μg/disc.

The concentrations of plant extracts applied to the discs were 500 and 100 μg. They were selected experimentally. The Petri dishes were incubated in triplicates for 24 ± 0.5 h at optimal temperatures for each bacterial strain. The results were recorded as the presence and size, mm, of bacteria-free areas around the disc and taken as a mean value [26–27].

Statistical analysis. All experiments were triplicated, their results expressed as the mean ± standard deviation. The one-way ANOVA (*F*-test) made it possible to determine statistically significant differences between the mean values. It involved the GraphPad Prism 7.04 software (GraphPad Software Inc., USA) [27]. The tests that featured cell lines were normalized to the mean cell viability values, their results presented as mean values with error margins. The confidence intervals for the statistical differences between the control and experimental groups were presented as ranks (**** for $p < 0.0001$, ** for $p < 0.01$, and * for $p < 0.05$). The ranks were absent in cases of insignificance.

Results and discussion

According to the gravimetry conducted, the total yields of the *Glycyrrhiza glabra* L., *Salix alba* L., and *Echium vulgare* L. extracts were 32.18, 13.82, and 20.96%, respectively. Figures 2–4 and Table 1 illustrate the results of the high-performance liquid chromatography (HPLC) analysis.

The *G. glabra* extract (Fig. 2) contained derivatives of daidzein (279.1 mg/kg), apigenin (567.1 mg/kg), formononetin (21.7 mg/kg), daidzein (579.6 mg/kg), genistein (160.2 mg/kg), and catechin (2014.7 mg/kg). The *S. alba* extract (Fig. 3) contained catechin and ferulic acid while the *E. vulgare* extract (Fig. 4) contained rosmarinic acid (3,479.0 mg/kg), astragalin (26.6 mg/kg), quercetin derivatives (315.0 mg/kg), apigenin (264.2 mg/kg), quercetin-3D-glucoside (239.8 mg/kg), rutin (861.6 mg/kg), hyperoside (257.3 mg/kg), and other polyphenolic compounds that accounted for its therapeutic properties [12].

The therapeutic value of medicinal plants depends on the bioactive substances they contain [12, 28]. To define the trends in the content of our bioactive substances, we compared our results with those published elsewhere.

The bioactive pharmacological profile of *S. alba* extracts was reported to include flavonoids, phenolic acids, and saponins [29–32]. In our case, we detected ferulic acid and quercetin-3D-glucoside, which was confirmed by other scientists [30, 33–34]. Quercetin-3D-glucoside was found in extracts of *Salix triandra, Salix acutifolia, S. alba,* and other plants; *S. triandra*, *S. acutifolia,* and *S. alba* extracts were also reported to contain rutin [30, 33, 34]. Rutin and quercetin are flavonoids that are exogenous low molecular weight antioxidants able to neutralize the action of active oxygen molecules [35]. Phenolic compounds are major contributors to the antioxidant activity of plant extracts [36, 37]; the magnitude depends on the *Salix* species and extractant [38–40].

The antioxidant effect of *S. alba* is due to its ability to inhibit reactive oxygen species. The anti-inflammatory effect of its extracts is traced to the inhibition of prostaglandins, the inflammatory markers, and the nitric oxide in macrophages [41].

Gligorić *et al*. [42] obtained 30.21% aqueous methanol *S. alba* extract, including 1.92 mg/g flavonoids and 6.25 ± 0.75 mg/g phenolic compounds. The phenolics included 1.60 mg/g rutin and 0.39 mg/g quercetin. The dry extracts also contained salicin (4.50 mg/g), gallic acid (0.59 mg/g), chlorogenic acid (1.89 mg/g), *n*-hydroxybenzoic acid (0.48 ± 0 mg/g), syringic acid (0.19 mg/g), *n*-coumaric acid (0.16 mg/g), and trans-cinnamic acid (0.03 mg/g). The composition of the plant extract depended on the extraction mode and the extractant. In our case, the extractant allowed us to obtain extracts with quercetin and ferulic acid, which are known for their reliable and diverse therapeutic effects [17–20, 33, 34].

In our research, the aqueous methanol extracts of *E. vulgare* demonstrated antioxidant activity, as well as the ability to inhibit Gram-negative bacteria: the lysis zone against *Pseudomonas aeruginosa* ranged from 6.5 to 10.0 mm. Other authors trace these properties to the presence of rosmarinic acid, astragalin, quercetin-derivatives, apigenin derivatives, and other polyphenolic compounds [12, 28]. Our research was consistent with some previous empirical findings [43–46]. Kapusterynska *et al*. [43] reported aqueous methanol

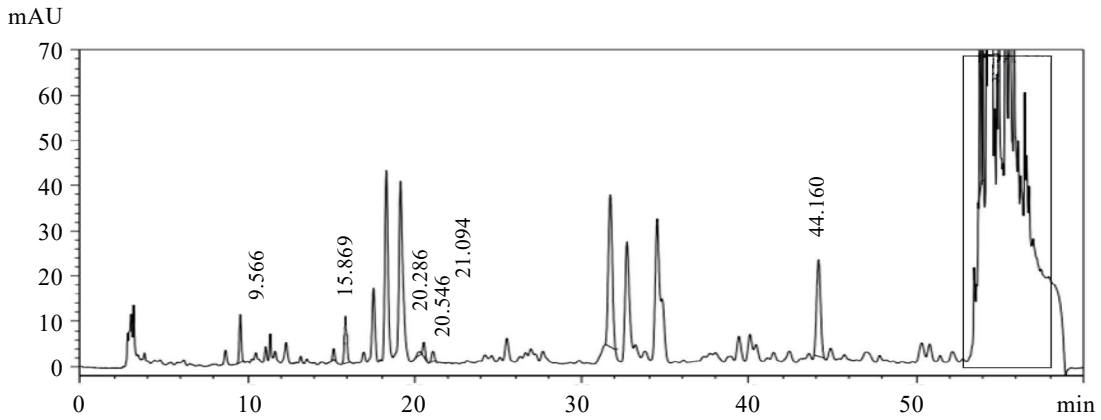


Figure 2. HPLC results for aqueous methanol extract of *Glycyrrhiza glabra* L.: 9.566 min – catechin; 15.869 min, 20.286 min, 20.546 min – apigenin derivatives; 21.094 min – genistein; 31.703 min – daidzein; 44.160 min – daidzein derivatives; and 53.803 min – formononetin

Рисунок 2. Результаты ВЭЖХ водно-спиртового экстракта *Glycyrrhiza glabra* L.: катехин – 9,566 мин; производные апигенина – 15,869 мин, 20,286 мин, 20,546 мин; генистеин – 21,094 мин; даидзеин – 31,703 мин; производные даидзеина – 44,160 мин; формононетин – 53,803 мин

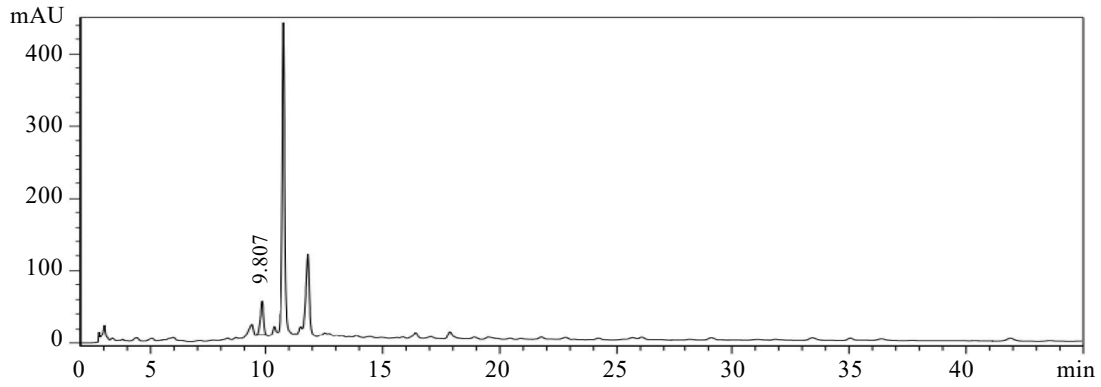


Figure 3. HPLC results for aqueous methanol extract of *Salix alba* L.: 9.824 min – catechin; 16.301 min – ferulic acid

Рисунок 3. Результаты ВЭЖХ для водно-спиртового экстракта *Salix alba* L.: катехин – 9,824 мин; феруловая кислота – 16,301 мин

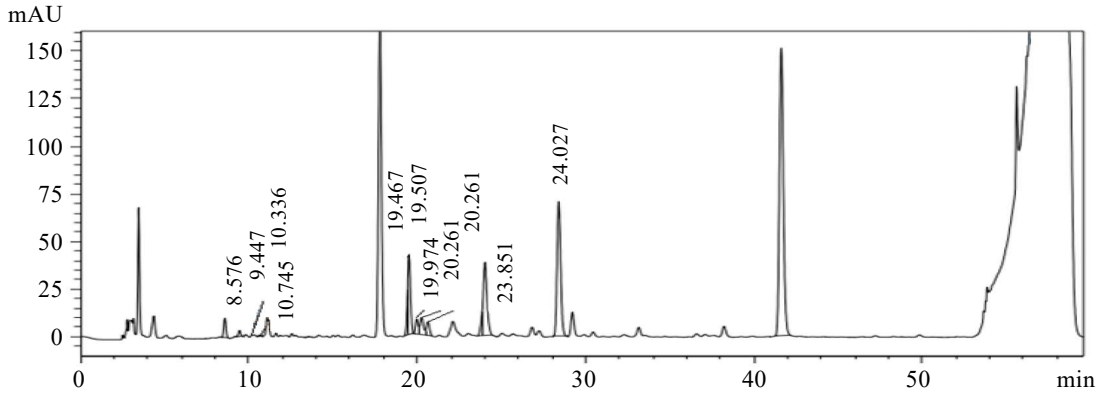


Figure 4. HPLC results for aqueous methanol extract of *Echium vulgare* L.: 8.576 min – neochlorogenic acid; 9.447 min – 2,5-dihydroxybenzoic acid; 10.336 min – chlorogenic acid; 10.745 min – caffeic acid; 19.467 min – hyperoside; 19.507 min – rutin; 19.974 min, 23.851 min – quercetin derivatives; 20.261 min – quercetin-3D-glucoside; 20.626 min – apigenin derivative; 24.027 min – astragalin; and 28.397 min – rosmarinic acid

Рисунок 4. Результаты ВЭЖХ водно-спиртового экстракта *Echium vulgare* L.: неохлорогеновая кислота – 8,576 мин; 2,5-дигидроксибензойная кислота – 9,447 мин; хлорогеновая кислота – 10,336 мин; кофейная кислота –10,745 мин; гиперозид – 19,467 мин; рутин – 19,507 мин; производные кверцетина – 19,974 мин, 23,851 мин; кверцетин-3D-глюкозид – 20,261 мин; производное апигенина – 20,626 мин; астрагалин – 24,027 мин; розмариновая кислота – 28,397 мин

Table 1. Secondary metabolites in *Glycyrrhiza glabra* L., *Salix alba* L., and *Echium vulgare* L. extracts

Таблица 1. Вторичные метаболиты в экстрактах *Glycyrrhiza glabra* L., *Salix alba* L., и *Echium vulgare* L.

Bioactive substances	Retention time, min	Content, mg/kg		
		Glycyrrhiza glabra	*Salix alba*	*Echium vulgare*
Neochlorogenic acid	8.6 ± 0.5	–*	–	56.1 ± 2.2
2,5-dihydroxybenzoic acid	9.4 ± 0.5	–	–	284.5 ± 11.4
Catechin	9.6 ± 0.5	2,014.7 ± 72.5	9,590.0 ± 431.5	–
Chlorogenic acid	10.3 ± 0.5	–	–	203.2 ± 6.1
Caffeic acid	10.7 ± 0.5	–	–	40.6 ± 1.6
Apigenin derivative	15.8 ± 0.5	218.8 ± 74.3	–	–
Ferulic acid	16.3 ± 0.5	–	3.1 ± 0.1	–
Hyperoside	19.5 ± 0.5	–	–	257.3 ± 10.2
Rutin	19.6 ± 0.5	–	–	861.6 ± 31.0
Quercetin derivative	19.9 ± 0.5	–	–	14.5 ± 0.6
Quercetin-3D-glucoside	20.2 ± 0.5	–	–	239.8 ± 11.9
Apigenin derivative	20.3 ± 0.5	348.3 ± 8.7	–	–
Apigenin derivative	20.6 ± 0.5	–	–	264.2 ± 10.5
Genistein	21.1 ± 0.5	160.2 ± 5.2	–	–
Quercetin derivative	23.9 ± 0.5	–	–	43.2 ± 2.1
Astragalin	24.0 ± 0.5	–	–	26.6 ± 0.8
Rosmarinic acid	28.4 ± 0.5	–	–	3,479.0 ± 139.1
Daidzein	31.7 ± 0.5	579.6 ± 16.2	–	–
Daidzein derivative	44.2 ± 0.5	279.1 ± 12.5	–	–
Formononetin	53.8 ± 0.5	21.70 ± 0.97	–	–

Note: * – means below detection limit. Data presented as a mean ± SD (n = 3).

Примечание: * – значение ниже предела обнаружения. Данные представлены в виде среднего значения ± SD (n = 3).

extracts of *E. vulgare* to contain, catechol, and such catechin phenolic acids as gallic, benzoic, isoferulic, chlorogenic, vanillic, salicylic, ferulic, *n*-hydroxybenzoic, protocatecholic, alpha-coumaric, and *n*-coumaric acids [43]. Kuruüzüm-Uz *et al*. [44] described kaempferol 3-O-neohesperidoside, uridine, and rosmarinic acid as the main phytochemicals of *E. vulgare* extract.

Cytotoxic properties may significantly limit the potential use of plant extracts. We used spectrophotometry to assess the viability of healthy (blood mononuclear) cells and T-lymphoblastic leukemia (Jurkat) cells using the WST-1 staining.

We revealed a concentration-dependent decrease in cell viability after 24-hour exposure to each extract (Figs. 5–7). Jurkat cells were less sensitive to the inhibitory effects. The *S. alba* extract showed the highest cytotoxic effect against blood mononuclear cells, reducing their viability to 6.79% at a concentration of 100 μg/mL (Fig. 5). The Jurkat cell viability was reduced to 17%.

In contrast to the *S. alba* extract samples, those of *G. glabra* were able to reduce the viability of blood mononuclear cells only at the maximal concentration of 100 μg/mL (Fig. 6). Jurkat cells demonstrated no decrease in viability.

The *E. vulgare* extract samples (Fig. 7) exhibited less cytotoxic effect than *S. alba* (Fig. 5) but more than *G. glabra* (Fig. 6).

The extract samples of *S. alba*, *G. glabra*, and *E. vulgare* had different magnitudes of cytotoxicity towards human blood cells while Jurkat cells showed greater resistance to the inhibitory effects of all three extracts.

As for the cytotoxic effect on human cells, all three extracts reduced the cell viability of both types of cells. The decrease in the count of viable cells was concentration-dependent (Figs. 5–7). The extract samples of *G. glabra* had a cytotoxic effect on blood mononuclear cells only at the highest concentration value – 100 μg/mL (Fig. 6). The inhibitory effect of *S. alba* and *E. vulgare* extract samples was observed at a concentration of 10 μg/mL (Figs. 5, 7). Jurkat cells showed greater resistance to the cytotoxic action than blood mononuclear cells. Although the mechanisms of antitumor action of plant extracts are well-studied [11], their potential cytotoxicity and immunotoxicity require careful consideration [47, 48].

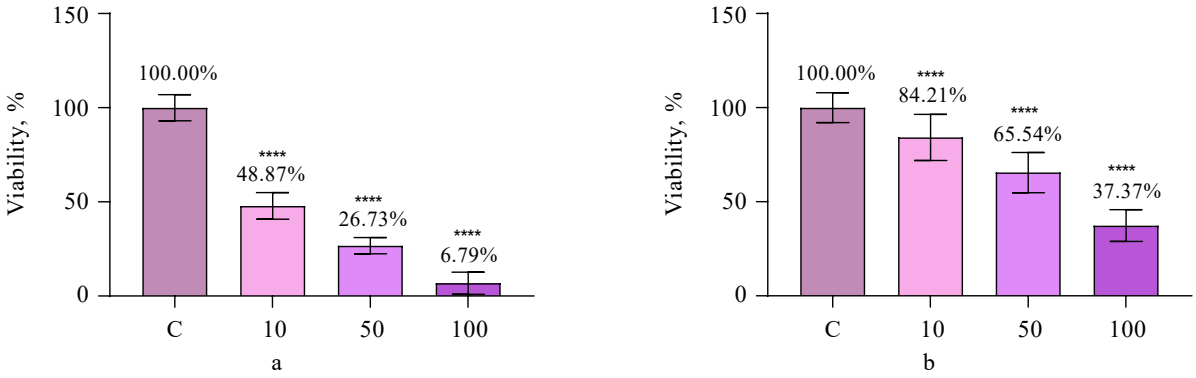
The difference in the cytotoxicity may be due to the differences in the content of bioactive substances that combine toxic and permeabilizing effects with potential therapeutic action. The *G. glabra* extracts demonstrated lower cytotoxicity, which renders it good prospects as a component of antitumor drugs [11].

The antioxidant activity results (Table 2) showed that the *S. alba* extract had significantly higher antioxidant activity than *G. glabra* and *E. vulgare*. The antioxidant activity of the *S. alba* extract was 634.9 μmol TE/g

(ABTS method), which was 4.0 times higher than the antioxidant activity of *G. glabra* extract and 7.2 times higher than that of the of *E. vulgare* extract. Similar results were obtained by DPPH and FRAP.

The antioxidant activity of the *E. vulgare* extract was 87.82 μmol TE/g (ABTS) and 74.58 μmol TE/g (DPPH). In our studies, the phytochemical composition of the extracts proved to be unique. They possessed reducing potential and exhibited antioxidant properties (55.80 μmol TE/g, FRAP). The empirical evidence was supported by the results of other researchers. In [45, 46, 49], the extracts of *E. vulgare* were rich in such natural antioxidants as phenolic acids, flavonoids, and tannins, which exhibited potent antioxidant activity. Alsanie *et al*. [50] obtained *E. vulgare* extract with 70%, v/v, water-methanol extractant, and it contained a lot of various phenolic compounds, especially gallic acid and quercetin. The content of flavonoids reached 35.98 mg quercetin/g, the content of phenolic compounds was 16.82 mg GA/g, and the total content of flavonoids was 35.98 mg quercetin/g. The antioxidant properties of the extract depended on the content of these compounds.

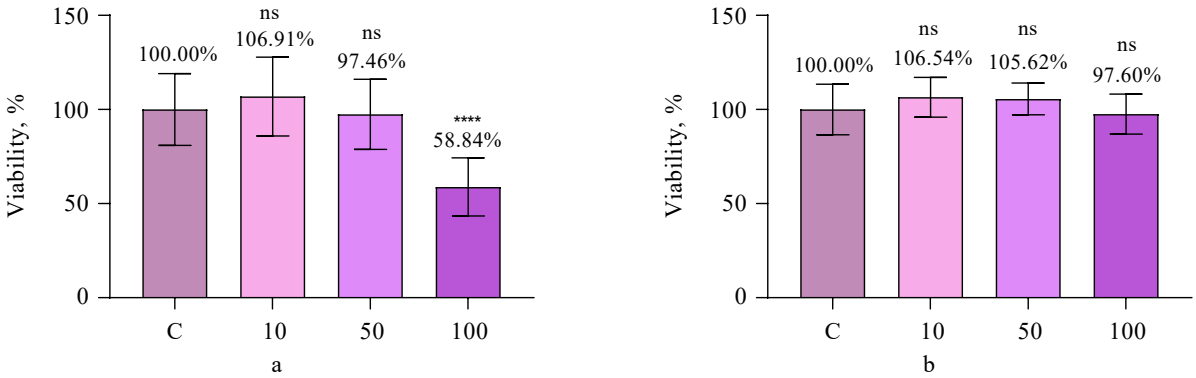
The mechanism by which flavonoids manifest their antioxidant potential in plants is also important. Flavonoids have a wide range of antioxidant mechanisms. As a rule, they suppress the activity of the enzyme peroxidase by



**** – marks significant difference from the control ($p < 0.0001$). Statistical analysis involved one-way ANOVA and *F*-test followed by Tukey's test in GraphPad Prism 7.04

Figure 5. Viability of blood mononuclear cells (a) and Jurkat cells (b) after culturing with *Salix alba* L. extract samples at different concentrations: C – control; 10, 50, 100 – extract concentration of 10, 50, 100 μg/mL, respectively; cultivation time – 24 h

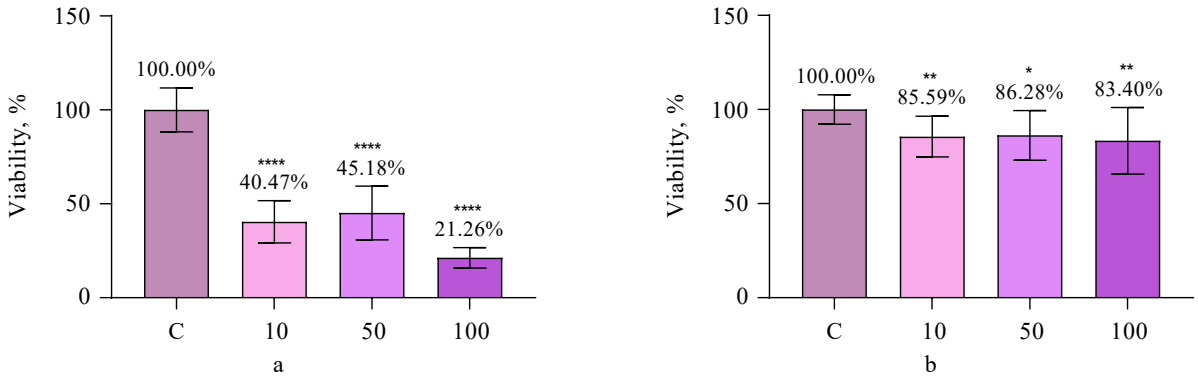
Рисунок 5. Жизнеспособность мононуклеарных клеток крови (a) и клеток линии Jurkat (b) после культивирования с образцами экстракта *Salix alba* L. в разных концентрациях: C – контроль; 10, 50, 100 – концентрация экстракта 10, 50, 100 мкг/мл соответственно; время культивирования – 24 ч



**** – marks significant difference from the control ($p < 0.0001$). Statistical analysis involved one-way ANOVA and *F*-test followed by Tukey's test in GraphPad Prism 7.04

Figure 6. Viability of blood mononuclear cells (a) and Jurkat cells (b) after culturing with *Glycyrrhiza glabra* L. extract samples at different concentrations: C – control; 10, 50, 100 – extract concentration of 10, 50, 100 μg/mL, respectively; cultivation time – 24 h; ns – non-significant differences

Рисунок 6. Жизнеспособность мононуклеарных клеток крови (a) и клеток линии Jurkat (b) после культивирования с образцами экстракта *Glycyrrhiza glabra* L. в различных концентрациях: C – контроль; 10, 50, 100 – концентрация экстракта 10, 50, 100 мкг/мл соответственно; время культивирования – 24 ч; ns – несущественные отличия



* – marks significant difference from the control ($p < 0.005$); ** – marks significant difference from the control ($p < 0.001$); **** – marks significant difference from the control ($p < 0.0001$). Statistical analysis involved one-way ANOVA and *F*-test followed by Tukey's test in GraphPad Prism 7.04

Figure 7. Viability of blood mononuclear cells (a) and Jurkat cells (b) after culturing with *Echium vulgare* L. extract samples at different concentrations: C – control; 10, 50, 100 – extract concentration of 10, 50, 100 μg/mL, respectively; cultivation time – 24 h

Рисунок 7. Жизнеспособность мононуклеарных клеток крови (a) и клеток линии Jurkat (b) после культивирования с образцами экстракта *Echium vulgare* L. в различных концентрациях: C – контроль; 10, 50, 100 – концентрация экстракта 10, 50, 100 мкг/мл соответственно; время культивирования – 24 ч

Table 2. Antioxidant activity of *Glycyrrhiza glabra* L., *Salix alba* L., and *Echium vulgare* L. extract samples

Таблица 2. Антиоксидантная активность экстрактов *Glycyrrhiza glabra* L., *Salix alba* L. и *Echium vulgare* L.

Extracts	Antioxidant activity, μmol TE/g		
	ABTS	DPPH	FRAP
Glycyrrhiza glabra	158.86 ± 4.74	37.02 ± 2.22	14.99 ± 0.45
Salix alba	634.90 ± 19.02	412.58 ± 24.72	219.79 ± 6.57
Echium vulgare	87.82 ± 5.22	74.58 ± 2.23	55.80 ± 2.47

Note: All values in the columns were significantly different from each other ($p < 0.05$, Tukey's test).

Примечание: Все значения в столбцах существенно отличаются друг от друга ($p < 0,05$, тест Тьюки).

destroying its structure. They also inhibit the activity of both singlet and triplet oxygen, as well as bind free radicals [51].

Bioactivity depends not only on the amount of phenolics, but also on the nature and structure of the phenolic compound [52–54]. According to Soobrattee *et al*. [55], the intensity of the binding reaction of free radicals by natural flavonoids, phenolic acids, and their derivatives depends directly on the number of free hydroxyl groups in their structures. These findings were confirmed by other scientists who proved the antioxidant, antiviral, antimicrobial, anti-inflammatory, anxiolytic, and analgesic properties of *E. vulgare* extracts [13].

Bioactivity also depends on the extraction method, particularly the type and nature of the extractant used [56–58]. For example, Algerian *Echium* aqueous methanol extracts with an IC50 of 110.8 μg/mL were superior to methanol extracts [57].

Spectrophotometric methods (ABTS, FRAP, DPPH) showed that the methanol extracts of *Echium* had reliable antioxidant activity. They were also rich in flavonoids (16.26 mg CE/g dry weight) [59]. Similar DPPH results were obtained by Kefi *et al*. [60], who studied the antioxidant potential of *Echium* ethyl acetate extracts. *Echium rubrum* L. and *E. vulgare* plant extracts demonstrated health-beneficial antioxidant profile, confirmed by ABTS, FRAP, and DPPH [61].

Hashemi *et al*. [62] studied the phytochemical composition and biological potential of methanol extracts of *E. vulgare*: they contained ≤42.64 QE/g flavonoids and showed an antioxidant activity of 162.3 μg/mL (DPPH).

Dresler *et al*. [63] discovered that unfavorable growing conditions contributed to the accumulation of phenolic compounds in plants and increased the antioxidant potential of their extracts. In our studies, the yield of phenolic compounds and their antioxidant activity depended on the extraction method. According to Tahmouzi [64], they also depend on the drying mode and its technological parameters.

Other authors confirmed the high antioxidant potential of *Echium italicum* L., *E. vulgare*, *Echium parviflorum* L., and *Echium angustifolium* L. plants in a series of experiments based on the FRAP and DPPH methods [65–67].

Table 3. Antibacterial activity of *Glycyrrhiza glabra* L., *Salix alba* L., and *Echium vulgare* L. extract: inhibition zone diameter, mm

Таблица 3. Антибактериальная активность экстрактов *Glycyrrhiza glabra* L., *Salix alba* L. и *Echium vulgare* L.: диаметр зоны ингибирования, мм

Samples	Concentration, µg/disk	Test strain			
		Escherichia coli	*Bacillus subtilis*	*Pseudomonas aeruginosa*	*Candida albicans*
Glycyrrhiza glabra	100	6.5 ± 0.5	8.0 ± 0.5	7.0 ± 0.5	0
	500	7.0 ± 0.5	9.0 ± 0.5	8.5 ± 0.5	0
Salix alba	100	0	0	0	0
	500	0	0	–	0
Echium vulgare	100	0	6.5 ± 0.5	7.0 ± 0.5	0
	500	0	10.0 ± 0.5	10.0 ± 0.5	0
Control (kanamycin)	50	12.0 ± 0.5	13.0 ± 0.5	14.0 ± 0.5	–
Control (fluconazole)	500	–	–	–	10.0 ± 0.5
Negative control (methanol)	–	0	0	0	0

Note: All values in the columns were significantly different from each other ($p < 0.05$, Tukey's test).

Примечание: все значения в столбцах существенно отличаются друг от друга ($p < 0,05$, тест Тьюки).

According to Dang *et al*. [68], the plant extract of *G. glabra* contained liquiritigin and its derivatives. The content of liquiritin was 5.037 mg/g while that of its derivatives was 1.8 times less. The content of apigenin-rutinoside was 2.571 mg/g, and the content of liquiritigenin-apiosylglucoside was 2.946 mg/g. The strong antioxidant potential could be due to these compounds since liquiritin is known to have potent anti-inflammatory, antioxidant, and antimicrobial properties.

Dang *et al*. [68] also reported *G. glabra* extract to contain various isoflavones, flavonols, flavanones, and chalcones, as well as other isoflavone compounds, flavonoids, and isoflavone acids. This unique composition is responsible for the remarkable antioxidant action of the plant. Isoflavones (ispaglabridins A, B; glabridin) are especially known for their antioxidant potential [69].

The antioxidant efficacy of the *G. glabra* methanolic extract was demonstrated using the DPPH free radical scavenging method in [70]. Its antioxidant potential depended on the concentration: it was 85.47% at 50 µg/mL, and the highest antioxidant activity (79.29%) was recorded for the 1,000 µg/mL extract. In fact, the antioxidant activity of the concentrated plant extract was comparable to that of ascorbic acid (385.85 µg/mL IC50).

According to Dang *et al*. [68], saponins from the extract of *G. glabra* also exhibited strong antiviral, anti-inflammatory, and immunoregulatory properties [68].

As demonstrated by *Candida albicans*, the plant extracts of *G. glabra*, *S. alba*, and *E. vulgare* exerted no fungicidal activity (Table 3). The *S. alba* extract had no antibacterial properties. The plant extracts of *E. vulgare* and *G. glabra* had an inhibitory effect on both Gram-positive and Gram-negative bacteria.

In addition to their known antioxidant activity, *G. glabra* extracts were reported to have remarkable antibacterial effects [71, 72]. These findings are supported by both our empirical data (Table 3) and other publications [73, 74]. For instance, the extracts of *G. glabra* could inhibit the vital activity of *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus*, and *Escherichia coli* [73, 74].

Extracts of *G. glabra*, *S. alba*, and *E. vulgare* require more phytochemical study to isolate and identify their valuable bioactive components. Such studies may help to investigate the mechanisms of synergism at the molecular level [75], which may be able to reduce the denaturation and speciation of several valuable plant components.

Conclusion

In this research, the aqueous methanol extracts of *Glycyrrhiza glabra* L., *Salix alba* L., and *Echium vulgare* L. exhibited strong antioxidant and antimicrobial properties. The extract of *G. glabra* contained daidzein derivatives (279.1 mg/kg), apigenin (567.1 mg/kg), formononetin (21.7 mg/kg), daidzein (579.6 mg/kg), as well as genistein (160.2 mg/kg) and catechin (2,014.7 mg/kg). The *S. alba* extract contained catechin and ferulic acid. The *E. vulgare* extract was rich in rosmarinic acid (3,479.0 mg/kg), astragalin (26.6 mg/kg), quercetin derivatives (315.0 mg/kg), apigenin (264.2 mg/kg), quercetin-3D-glucoside (239.8 mg/kg), rutin (861.6 mg/kg), hyperoside (257.3 mg/kg), and some other polyphenolic compounds.

The antioxidant activity (ABTS) of *S. alba* extract was four times greater than that of *G. glabra* and more than seven times higher than that of *E. vulgare*. Similar antioxidant results were provided by the DPPH and FRAP methods. The extracts of *G. glabra* were active against Grampositive and Gram-negative bacteria while the *E. vulgare* extracts were able to inhibit Gram-negative bacteria. However, none of the extracts showed any activity against *Candida albicans*.

The extracts of *S. alba* and *E. vulgare* at 10, 50, and 100 µg/mL reduced the viability of T-lymphoblastic leukemia (Jurkat) cells and human blood mononuclear

cells after 24 h of exposure. The *G. glabra* extracts were less cytotoxic. The viability of Jurkat cells remained unaffected whereas mononuclear cells died only at the highest concentration of 100 μg/mL.

The revealed antioxidant and antibacterial effects of *G. glabra*, *E. vulgare*, and *S. alba* aqueous methanol extracts on human blood cell lines provide a better understanding of the role of plant medicines in modern medical practices.

Contribution

S.A. Sukhikh was responsible for data curation, research, drafting, and proofreading. S.A. Ivanova provided formal analysis, drafting, and proofreading. A.Kh. Bakhtiarova was responsible for data curation and research. S.E. Pshenichnikov developed the research methodology and performed the research. K.V. Levada developed the research methodology and performed the research. O.O. Babich designed the research methodology and concept, supervised the project, performed the research, and drafted the original manuscript.

Conflict of interest

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

Критерии авторства

С. А. Сухих – сбор данных, проведение исследований, написание статьи и редактирование. С. А. Иванова – формальный анализ, написание статьи и редактирование. А. Х. Бахтиарова – сбор данных и проведение исследований. С. Е. Пшеничников – разработка методологии, проведение исследований. Е. В. Левада – разработка методологии, проведение исследований. О. О. Бабич – разработка методологии и концепции, проведение исследований, руководство проектом, написание статьи.

Конфликт интересов

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

References

1. Albahri G, Badran A, Abdel Baki Z, Alame M, Hijazi A, *et al*. Potential anti-tumorigenic properties of diverse medicinal plants against the majority of common types of cancer. Pharmaceuticals. 2024;17(5):574. https://doi.org/10.3390/ph17050574

2. Martemucci G, Costagliola C, Mariano M, d'andrea L, Napolitano P, *et al*. Free radical properties, source and targets, antioxidant consumption and health. Oxygen. 2022;2(2):48–78. https://doi.org/10.3390/oxygen2020006

3. Chehelgerdi M, Chehelgerdi M, Allela OQB, Pecho RDC, Jayasankar N, *et al*. Progressing nanotechnology to improve targeted cancer treatment: Overcoming hurdles in its clinical implementation. Molecular cancer. 2023;22(1):169. https://doi.org/10.1186/s12943-023-01865-0

4. Pshenichnikov S, Omelyanchik A, Efremova M, Lunova M, Gazatova N, *et al*. Control of oxidative stress in Jurkat cells as a model of leukemia treatment. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021;523:167623. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167623

5. Kleiveland CR. Peripheral blood mononuclear cells. In: Verhoeckx K, Cotter P, López-Expósito I, Kleiveland C, Lea T, editors. The Impact of Food Bioactives on Health. NY: Springer; 2015. pp. 161–167. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16104-4_15

6. Hameete BC, Plösch T, Hogenkamp A, Groenink L. A systematic review and risk of bias analysis of *in vitro* studies on trophoblast response to immunological triggers Placenta. 2024;166:164–175. https://doi.org/10.1016/j.placenta.2024.10.010

7. Sorrenti V, Burò I, Consoli V, Vanella L. Recent advances in health benefits of bioactive compounds from food wastes and by-products: Biochemical aspects. International Journal of Molecular Sciences. 2023;24(3):2019. https://doi.org/10.3390/ijms24032019

8. Chatterjee N, Komaravolu RK, Durant CP, Wu R, McSkimming C, *et al*. Single cell high dimensional analysis of human peripheral blood mononuclear cells reveals unique intermediate monocyte subsets associated with sex differences in coronary artery disease. International Journal of Molecular Sciences. 2024;25(5):2894. https://doi.org/10.3390/ijms25052894

9. Varadé J, Magadán S, González-Fernández Á. Human immunology and immunotherapy: Main achievements and challenges. Cellular & Molecular Immunology. 2021;18(4):805–828. https://doi.org/10.1038/s41423-020-00530-6

10. Pastorino G, Cornara L, Soares S, Rodrigues F, Oliveira MBP. Liquorice (*Glycyrrhiza glabra*): A phytochemical and pharmacological review. Phytotherapy research. 2018;32(12):2323–2339. https://doi.org/10.1002/ptr.6178

11. Wahab S, Annadurai S, Abullais SS, Das G, Ahmad W*, et al. Glycyrrhiza glabra* (Licorice): A comprehensive review on its phytochemistry, biological activities, clinical evidence and toxicology. Plants. 2021;10(12):2751. https://doi.org/10.3390/plants10122751

12. Frolova OO, Kompantseva EV, Dementieva TM. Biologically active substances of plants of the genus Willow (*Salix* L.). Pharmacy & Pharmacology. 2016;4(2):41–59. (In Russ.) [Фролова О. О., Компанцева Е. В., Дементьева Т. М. Биологически активные вещества растений рода Ива (*Salix* L.). Фармация и фармакология. 2016. Т. 4. № 2. С. 41–59.] https://doi.org/10.19163/2307-9266-2016-4-2(15)-41-59

13. Jin J, Boersch M, Nagarajan A, Davey AK, Zunk M. Antioxidant properties and reported ethnomedicinal use of the genus *Echium* (Boraginaceae). Antioxidants. 2020;9(8):722. https://doi.org/10.3390/antiox9080722

14. Swamy MK, Patra JK, Rudramurthy GR. Medicinal plants: Chemistry, pharmacology, and therapeutic applications. FL: CRC Press; 2019. 256 p.

15. Ng CX, Affendi MM, Chong PP, Lee SH. The potential of plant-derived extracts and compounds to augment anticancer effects of chemotherapeutic drugs. Nutrition and Cancer. 2022;74(9):3058–3076. https://doi.org/10.1080/01635581.2022.2069274

16. Wainwright CL, Teixeira MM, Adelson DL, Braga FC, Buenz EJ, *et al*. Future directions for the discovery of natural product-derived immunomodulating drugs: An IUPHAR positional review. Pharmacological Research. 2022;177:106076. https://doi.org/10.1016/j.phrs.2022.106076

17. Giacometti J, Kovačević DB, Putnik P, Gabrić D, Bilušić T, *et al*. Extraction of bioactive compounds and essential oils from mediterranean herbs by conventional and green innovative techniques: A review. Food Research International. 2018;113:245–262. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.036

18. Ligor M, Ratiu IA, Kiełbasa A, Al-Suod H, Buszewski B. Extraction approaches used for the determination of biologically active compounds (cyclitols, polyphenols and saponins) isolated from plant material. Electrophoresis. 2018;39(15):1860–1874. https://doi.org/10.1002/elps.201700431

19. Pintać D, Majkić T, Torović L, Orčić D, Beara I, *et al*. Solvent selection for efficient extraction of bioactive compounds from grape pomace. Industrial Crops and Products. 2018;111:379–390. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.038

20. Zengin G, Stefanucci A, Rodrigues MJ, Mollica A, Custodio L, *et al*. *Scrophularia lucida* L. as a valuable source of bioactive compounds for pharmaceutical applications: *In vitro* antioxidant, anti-inflammatory, enzyme inhibitory properties, *in silico* studies, and HPLC profiles. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 2019;162:225–233. https://doi.org/10.1016/j.jpba.2018.09.035

21. Lu Z, Mei G, Zhong F, Gu Y, Xi J, *et al*. Iridoids and lignans from *Valeriana officinalis* and their bioactivities. Phytochemistry. 2025;229:114311. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2024.114311

22. Sukhikh S, Ivanova S, Babich O, Larina V, Krol O, *et al*. Antimicrobial screening and fungicidal properties of *Eucalýptus globulus* ultrasonic extracts. Plants. 2022;11(11):1441. https://doi.org/10.3390/plants11111441

23. Villalva M, Macphail S, Li Y, Caruana B. Isolating human peripheral blood mononuclear cells from buffy coats *via* high throughput immunomagnetic bead separation. Journal of Visualized Experiment. 2024;209:66887. https://doi.org/10.3791/66887

24. Invitrogen. Thermo Fisher Scientific Inc. Countess II FL automated cell counter. User Guide. 2019. Pub. No. MAN0010644 E.0. 82 p.

25. Prilepsky AYu, Drozdov AS, Bogatyrev VA, Staroverov SA. Methods of working with cell cultures and determination of toxicity of nanomaterials. ITMO. Saint Petersburg, 2019; 43 p. (In Russ.) [Прилепский А. Ю., Дроздов А. С., Богатырев В. А., Староверов С. А. Методы работы с клеточными культурами и определение токсичности наноматериалов. СПб: Университет ИТМО, 2019; 43 с]

26. Sukhikh S, Ivanova S, Skrypnik L, Bakhtiyarova A, Larina V, *et al*. Study of the antioxidant properties of *Filipendula ulmaria* and *Alnus glutinosa*. Plants. 2022;11(18):2415. https://doi.org/10.3390/plants11182415

27. Babich O, Ivanova S, Ulrikh E, Popov A, Larina V, *et al*. Study of the chemical composition and biologically active properties of *Glycyrrhiza glabra* extracts. Life. 2022;12(11):1772. https://doi.org/10.3390/life12111772

28. Frolova OO, Kompantseva EV, Dementieva TM. Biologically active substances of plants from *Salix* L. Genus. Pharmacy & Pharmacology. 2016;4(2):41–59. (In Russ.) [Фролова О. О., Компанцева Е. В., Дементьева Т. М. Биологически активные вещества растений рода Ива (*Salix* L.). Фармация и фармакология. 2016. Т. 4. № 2. С. 41–59.] https://doi.org/10.19163/2307-9266-2016-4-2(15)-41-59

29. Julkunen-Tiitto R. Phenolic constituents of *Salix*: A chemotaxonomic survey of further Finnish species. Phytochemistry. 1989;28(8):2115–2125. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)97930-5

30. Kompantsev VA. Development of treatment, preventive agents on the basis of polyphenols and polysaccharides: Author abstract for a thesis of Candidate of Pharmaceutical Sciences. Pyatigorsk, 1993; 48 p. (In Russ.) [Компанцев В. А. Разработка лечебных, профилактических средств на основе полифенолов и полисахаридов: Автореф. дис. д-ра фармац. наук. Пятигорск, 1993.; 48 с.]

31. Nasudari AA. Flavonoids of essential fractions of leaves of *Salix* L. species. Plant Resources. 1987;4:590–597.

32. Zuzuk BM, Kutsik RV, Nedostup AT, Khomenets IZ, Permyakov VV. *Salix alba* L. (Analytic review). Phytochemistry. 2005;24:2836–2843.

33. Petruk AA. Phenolic compounds of some representatives of the genus *Salix* (Salicaceae) of Asian Russia. Chemistry of Plant Raw Materials. 2011;(4):181–185.

34. Kompantsev VA. Chemical investigation for phenolic glycosides of some *Salix* species of the North Caucasus: Author abstract for a thesis of Candidate of Pharmaceutical Sciences. Pyatigorsk, 1970; 24 p. (In Russ.) [Компанцев В. А. Химическое изучение фенольных гликозидов некоторых видов ив Северного Кавказа: Автореф. дис. канд. фармац. наук. Пятигорск, 1970; 24 с.]

35. Obolentseva GV. Pharmacological investigation of antiulcer action of some flavonoids: Author abstract for a thesis of Candidate of Medical Sciences. Kharkov, 1964; 23 p. (In Russ.) [Оболенцева Г. В. Фармакологическое исследование противоязвенного действия некоторых флавоноидов: Автореф. дис. канд. мед. наук. Харьков, 1964; 23 с.]

36. Stefanucci A, Scioli G, Marinaccio L, Zengin G, Locatelli M, *et al*. A comparative study on phytochemical fingerprint of two diverse *Phaseolus vulgaris* var. Tondino del Tavo and Cannellino bio extracts. Antioxidants. 2022;11(8):1474. https://doi.org/10.3390/antiox11081474

37. Vera J, Herrera W, Hermosilla E, Díaz M, Parada J, *et al*. Antioxidant activity as an indicator of the efficiency of plant extract-mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles. Antioxidants. 2023;12(4):784. https://doi.org/10.3390/antiox12040784

38. Enayat S, Banerjee S. Comparative antioxidant activity of extracts from leaves, bark and catkins of *Salix aegyptiaca* sp. Food Chemistry. 2009;116(1):23–28. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.092

39. Gligorić E, Igić R, Čonić BS, Kladar N, Teofilović B, *et al*. Chemical profiling and biological activities of "green" extracts of willow species (*Salix* L., Salicaceae): Experimental and chemometric approaches. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2023;32:100981. https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.100981

40. Gligorić E, Igić R, Suvajdžić L, Grujić-Letić N. Species of the genus *Salix* L.: Biochemical screening and molecular docking approach to potential acetylcholinesterase inhibitors. Applied Sciences. 2019;9(9):1842. https://doi.org/10.3390/app9091842

41. Jeffers MD. Tannins as anti-inflammatory agents. Faculty of Miami University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Science. Miami: University Oxford, Ohio; 2006. pp. 1–11

42. Gligorić E, Igić R, Teofilović B, Grujić-Letić N. Phytochemical screening of ultrasonic extracts of *Salix* species and molecular docking study of *Salix*-derived bioactive compounds targeting pro-inflammatory cytokines. International Journal of Molecular Sciences. 2023;24(14):11848. https://doi.org/10.3390/ijms241411848

43. Kapusterynska AR, Hamada VR, Krvavych AS, *et al*. Investigation of the extract's composition of Viper's bugloss (*Echium vulgare*). Ukrainica bioorganica acta. 2020;15(1):42–46. https://doi.org/10.15407/bioorganica2020.01.042

44. Kuruüzüm-Uz A, Güvenalp Z, Ströch K, Demirezer LÖ, Zeeck A. Phytochemical and antimicrobial investigation of *Echium vulgare* growing in Turkey. Biochemical Systematics and Ecology. 2004;32(9):833–836. https://doi.org/10.1016/j.bse.2003.12.001

45. Rammal H, Farhan H, Hijazi A, Bassal A, Kobeissy A, *et al*. Phytochemical screening and antioxidant activity of *Centranthus longiflorus* L. Journal of Natural Product and Plant Resources. 2013;3(3):29–36.

46. Wong CC, Li HB, Cheng KW, Chen F. A systematic survey of antioxidant activity of 30 Chinese medicinal plants using the ferric reducing antioxidant power assay. Food Chemistry. 2006;97(4):705–711. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.049

47. Maistro EL, Terrazzas PM, Perazzo FF, O'Neill de Mascarenhas Gaivão I, Sawaya ACHF, *et al*. *Salix alba* (white willow) medicinal plant presents genotoxic effects in human cultured leukocytes. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A. 2019;82(23–24):1223–1234. https://doi.org/10.1080/15287394.2019.1711476

48. Somaida A, Tariq I, Ambreen G, Abdelsalam AM, Ayoub AM, *et al*. Potent cytotoxicity of four cameroonian plant extracts on different cancer cell lines. Pharmaceuticals. 2020;13(11):357. https://doi.org/10.3390/ph13110357

49. Farahani M, Branch Q, Azad I. Antiviral effect assay of aqueous extract of *Echium amoenum* L. against HSV-1. Zahedan Journal of Research in Medical Sciences. 2013;15(8):46–48.

50. Alsanie WF, El-Hallous EI, Dessoky ES, Ismail IA. Viper's bugloss (*Echium vulgare* L.) extract as a natural antioxidant and its effect on hyperlipidemia. International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research. 2018;8(1):81–89.

51. Anderson KJ, Teuber SS, Gobeille A, Cremin P, Waterhouse AL, *et al*. Walnut polyphenolics inhibit *in vitro* human plasma and LDL oxidation. The Journal of Nutrition. 2001;131(11):2837–2842. https://doi.org/10.1093/jn/131.11.2837

52. Aliyazıcıoglu R, Sahin H, Erturk O, *et al*. Properties of phenolic composition and biological activity of propolis from Turkey. International Journal of Food Properties. 2013;16(2):277–287. https://doi.org/10.1080/10942912.2010.551312

53. Siddique NA, Mujeeb M, Najmi AK, Khan HN, Farooqi H. WITHDRAWN: Evaluation of antioxidant activity, quantitative estimation of phenols and flavonoids in different parts of *Aegle marmelos*. Journal of Saudi Chemical Society. 2010;4:1–5. https://doi.org/10.1016/j.jscs.2010.10.005

54. Mhamdi B, Wannes WA, Sriti J, Jellali I, Ksouri R, *et al*. Effect of harvesting time on phenolic compounds and antiradical scavenging activity of *Borago officinalis* seed extracts. Industrial Crops and Products. 2010;31(1):e1–e4. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.002

55. Soobrattee MA, Neergheen VS, Luximon-Ramma A, Aruoma OI, Bahorun T. Phenolics as potential antioxidant therapeutic agents: Mechanism and actions. Mutation Research/Fundamental and Molecular mechanisms of mutagenesis. 2005;579(1–2):200–213. https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2005.03.023

56. Abed A, Vaseghi G, Jafari E, Fattahian E, Babhadiashar N, *et al*. Echium Amoenum Fisch. Et Mey: A review on its pharmacological and medicinal properties. Asian Journal of Medical and Pharmaceutical Researches. 2014;4(1):21–23.

57. Asghari B, Mafakheri S, Zarrabi MM, Erdem SA, Orhan IE, *et al*. Therapeutic target enzymes inhibitory potential, antioxidant activity, and rosmarinic acid content of *Echium amoenum*. South African Journal of Botany. 2019;120:191–197. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.05.017

58. Noroozpour Dailami K, Azadbakht M, Lashgari M, Rashidi Z. Prevention of selenite-induced cataractogenesis by hydroalchoholic extract of *Echium amoenum*: An experimental evaluation of the Iranian traditional eye medication. Pharmaceutical and Biomedical Research. 2015;1(4):40–47. http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.pbr.1.4.40

59. Chaouche TM, Haddouchi F, Ksouri R, Atik-Bekkara F. Evaluation of antioxidant activity of hydromethanolic extracts of some medicinal species from South Algeria. Journal of the Chinese Medical Association. 2014;77(6):302–307. https://doi.org/10.1016/j.jcma.2014.01.009

60. Kefi S, Essid R, Mkadmini K, Kefi A, Haddada FM, *et al*. Phytochemical investigation and biological activities of *Echium arenarium* (Guss) extracts. Microbial Pathogenesis. 2018;118:202–210. https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.02.050

61. Nićiforović N, Mihailović V, Mašković P, Solujić S, Stojković A, *et al*. Antioxidant activity of selected plant species; potential new sources of natural antioxidants. Food and Chemical Toxicology. 2010;48(11):3125–3130. https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.08.007

62. Hashemi Z, Ebrahimzadeh MA, Khalili M. Sun protection factor, total phenol, flavonoid contents and antioxidant activity of medicinal plants from Iran. Tropical Journal of Pharmaceutical Research. 2019;18(7):1443–1448. https://doi.org/10.4314/tjpr.v18i7.11

63. Dresler S, Wójciak-Kosior M, Sowa I, Stanisławski G, Bany I, *et al*. Effect of short-term Zn/Pb or long-term multi-metal stress on physiological and morphological parameters of metallicolous and nonmetallicolous *Echium vulgare* L. populations. Plant Physiology and Biochemistry. 2017;115:380–389. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.04.016

64. Tahmouzi S. Extraction, antioxidant and antilisterial activities of polysaccharides from the flower of viper's bugloss. International Journal of Biological Macromolecules. 2014;69:523–531. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.06.008

65. Abbaszadeh S, Rajabian T, Taghizadeh M. Antioxidant activity, phenolic and flavonoid contents of *Echium* species from different geographical locations of Iran. Journal of Medicinal Plants and By-products. 2013;2(1):23–31. https://doi.org/10.22092/jmpb.2013.108487

66. Eruygur N, Yilmaz G, Üstün O. Analgesic and antioxidant activity of some *Echium* species wild growing in Turkey. Fabad Journal of Pharmaceutical Sciences. 2012;37(3):151–159.

67. Vukajlović F, Pešić S, Tanasković S, Predojević DZ, Gvozdenac S, *et al*. Efficacy of *Echium* spp. water extracts as post-harvest grain protectants against *Plodia interpunctella*. Romanian Biotechnological Letters. 2019;24(5):761–769. https://doi.org/10.25083/rbl/24.5/761.769

68. Dang H, Zhang T, Wang Z, Li G, Zhao W, *et al*. Differences in the endophytic fungal community and effective ingredients in root of three *Glycyrrhiza* species in Xinjiang, China. PeerJ. 2021;9:e11047. https://doi.org/10.7717/peerj.11047

69. Sharma V, Katiyar A, Agrawal RC. *Glycyrrhiza glabra:* Chemistry and pharmacological activity. In: Mérillon J-M, Ramawat KG, editors. Sweeteners. NY: Springer; 2018. pp. 87–100. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27027-2_21

70. Semenescu I, Avram S, Similie D, Minda D, *et al*. Phytochemical, antioxidant, antimicrobial and safety profile of *Glycyrrhiza glabra* L. extract obtained from Romania. Plants. 2024;13(23):3265. https://doi.org/10.3390/plants13233265

71. Astaf'eva OV, Sukhenko LT. Comparative analysis of antibacterial properties and chemical composition of *Glycyrrhiza glabra* L. from Astrakhan region (Russia) and Calabria region (Italy). Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2014;156:829–832. https://doi.org/10.1007/s10517-014-2462-8

72. Chandra JH, Gunasekaran H. Screening of phytochemical, antimicrobial and antioxidant activity of *Glycyrrhiz glabra* root extract. Journal of Environmental Biology. 2017;38(1):161–165. https://doi.org/10.22438/jeb/38/1/MRN-441

73. Fukai T, Marumo A, Kaitou K, Kanda T, Terada S, *et al*. Antimicrobial activity of licorice flavonoids against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. Fitoterapia. 2002;73(6):536–539. https://doi.org/10.1016/S0367-326X(02)00168-5

74. Quintana SE, Cueva C, Villanueva-Bermejo D, Moreno-Arribas MV, Fornari T, *et al*. Antioxidant and antimicrobial assessment of licorice supercritical extracts. Industrial Crops and Products. 2019;139:111496. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111496

75. Yurchyshyn OI, Rusko HV, Kutsyk RV. Synergistic effects of ethanol medicinal plant extracts with erythromycin against skin strains of staphylococci with inducible phenotype of MLS-resistance. Annals of Mechnikov Institute. 2017;3:71–79. https://doi.org/10.5281/zenodo.1000150

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Сухих Станислав Алексеевич / Stanislav A. Sukhikh ORCID 0000-0001-7910-8388; eLIBRARY SPIN 1601-6061
Иванова Светлана Анатольевна / Svetlana A. Ivanova ORCID 0000-0002-1252-9572; eLIBRARY SPIN 1246-6109
Бахтиярова Алина Халимовна / Alina Kh. Bakhtiyarova eLIBRARY SPIN 2352-6982
Пшеничников Станислав Евгеньевич / Stanislav E. Pshenichnikov eLIBRARY SPIN 1246-6109
Левада Екатерина Викторовна / Kateryna V. Levada ORCID 0000-0002-6369-2118; eLIBRARY SPIN 1268-0361
Бабич Ольга Олеговна / Olga O. Babich ORCID 0000-0002-4921-8997; eLIBRARY SPIN 2744-9496

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2616
https://elibrary.ru/MFYULO

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Ключевые ориентиры финансового оздоровления товаропроизводителей в региональной системе антикризисного управления (на материалах сельскохозяйственных организаций Кемеровской области – Кузбасса)

С. Г. Черниченко*, Р. М. Котов

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 21.05.2025
Принята после рецензирования: 22.08.2025
Принята к публикации: 02.09.2025

**e-mail: chernichenko66@mail.ru*
© С. Г. Черниченко, Р. М. Котов, 2025

Аннотация.
Публикация посвящена проблемным вопросам финансового оздоровления товаропроизводителей на стадиях идентификации предкризисных ситуаций и их предупреждения. Цель – выявление и описание ключевых ориентиров финансового оздоровления товаропроизводителей в региональной системе антикризисного управления.
Объекты исследования – отдельные процессы, протекающие внутри организаций, и закономерности их функционирования с учетом влияния внешней среды. Для получения статистических данных использовали сконструированную ранее авторскую селективно-индикативную модель экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) организаций. Регионально-отраслевая спецификация модели ориентирована на выборочную совокупность крупных и средних сельскохозяйственных организаций Кемеровской области – Кузбасса (Россия), дифференцированных по принципу производственной специализации.
Хроника исследовательских событий отражала следующие эпизоды: выборка, интерпретация, тематическая типизация генеральных метрик (директ-индикаторов) риска банкротства, оценка их сопряженности с классическими критериями банкротства; структурирование риска банкротства (коммерческий риск и риск несбалансированной ликвидности) и фиксация метрик структурных компонентов риска; синтез директ-индикаторов риска банкротства в диагностическую конструкцию и разработка градационной шкалы модели; систематизация операционных инструментов риска банкротства в форме пирамидальной структуры (критерии банкротства, структурные компоненты риска банкротства, аналитические вектора антикризисной диагностики, директ-индикаторы банкротства, сигнальная аналитическая база банкротства (факторы предпочтительного роста и факторы предпочтительного снижения), количественные факторы банкротства); тестирование модели на материалах 38 предприятий; дифференциация предприятий по уровню риска банкротства (более 50 %, менее 50 %); выявление кризисных полей и ключевых ориентиров финансового оздоровления организаций; идентификация фундаментальных областей экономического воздействия по укреплению финансового здоровья субъектов региональной экономики. Ключевые ориентиры финансового оздоровления товаропроизводителей (рычаги антикризисного управления) идентифицировались с использованием системы операционных инструментов и генеральных метрик риска банкротства на базе кризисных полей в деятельности производителей.
Досудебное оздоровление должно стать стратегией, ориентированной на восстановление нормативного уровня платежеспособности. В качестве фундаментального ориентира устойчивого финансового здоровья региональных предприятий определены факторы роста собственного капитала и источников (элементов) его формирования. Недостаточность собственного капитала – серьезная финансовая проблема, имеющая массовый характер, что объясняет современную государственную рестрикционную монетарную политику, стимулирующую экспансию собственных средств товаропроизводителей.

Ключевые слова. Антикризисное управление, финансовое здоровье, финансовое оздоровление, ключевые ориентиры, риск банкротства, риск дефолта, регионально-отраслевая спецификация

Для цитирования: Черниченко С. Г., Котов Р. М. Ключевые ориентиры финансового оздоровления товаропроизводителей в региональной системе антикризисного управления (на материалах сельскохозяйственных организаций Кемеровской области – Кузбасса). Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 918–945. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2616

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2616
https://elibrary.ru/MFYULO

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

Key Benchmarks for Financial Recovery of Commodity Producers in the Regional System of Anti-Crisis Management: Agricultural Organizations of the Kemerovo Region

Svetlana G. Chernichenko*, Roman M. Kotov

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: 21.05.2025
Revised: 22.08.2025
Accepted: 02.09.2025

**e-mail: chernichenko66@mail.ru*
© S.G. Chernichenko, R.M. Kotov, 2025

Abstract.
This publication addresses the challenges of financial recovery for commodity producers at the stages of identifying and preventing pre-crisis situations. The research objective was to identify and describe the key benchmarks for financial recovery for commodity producers within the regional crisis management system.
The study included individual intra-corporate processes and their patterns while taking into account the external influences. A previously developed selective-indicative model for express diagnostics of bankruptcy risks provided statistical data. The regional and industry-specific model covered large and medium-sized agricultural organizations in the Kemerovo Region, Russia.
The research started with sampling, interpretation, and classification (direct indicators) of bankruptcy risks, which were then correlated with typical bankruptcy criteria. After structuring the bankruptcy risks into commercial risks and unbalanced liquidity risks, the authors recorded the metrics of structural risk components. Next stage involved a synthesis of direct bankruptcy risk indicators into a diagnostic structure to develop a gradation scale for the model. The operational bankruptcy risk instruments were structured as a pyramid that included bankruptcy criteria, structural components of bankruptcy risks, analytical vectors of anti-crisis diagnostics, direct bankruptcy indicators, bankruptcy signal analytical base (factors of preferred growth and decline), and quantitative bankruptcy factors. The model was tested on data obtained from 38 local enterprises. They were differentiated by bankruptcy risk level (≥ 50 vs. ≤50 %). After that, each enterprise was provided with crisis fields and key benchmarks for financial recovery, as well as fundamental areas of economic impact to strengthen the financial status of regional economic entities. The key benchmarks for the financial recovery of commodity producers (crisis management levers) were identified using a system of operational tools and general bankruptcy risk metrics based on the crisis areas identified in the producers' activities.
Pre-trial recovery should become a standard strategy aimed at restoring the regulatory solvency levels. Factors for the growth of equity capital and the sources (elements) of its formation were identified as fundamental benchmarks for the financial sustainability of regional agricultural enterprises. Insufficient equity capital is a serious and wide-spread financial problem. It explains the current government restrictive monetary policy, which stimulates the expansion of producers' equity capital.

Keywords. Anti-crisis management, financial health, financial recovery, key benchmarks, bankruptcy risk, default risk, regional and industrial specification

For citation: Chernichenko SG, Kotov RM. Key Benchmarks for Financial Recovery of Commodity Producers in the Regional System of Anti-Crisis Management: Agricultural Organizations of the Kemerovo Region. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):918–945. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2616

Введение

Статья посвящена проблемным вопросам финансового оздоровления товаропроизводителей на стадиях идентификации предкризисных ситуаций (кризисные сигналы, проблемные места, критические поля и т. п.) и их предупреждения. Тематические исследования опираются на антикризисные методические технологии (система научных методов, методик, методических подходов и др.) и синтезированные диагностические инструменты (авторская селективно-индикативная модель экспресс-диагностики риска банкротства с регионально-отраслевой спецификацией). Настоящая публикация завершает цикл авторских научных работ в рамках заданной тематики [1–3]. Исследовательская работа выполнена на материалах крупных и средних сельскохозяйственных организаций Кемеровской области – Кузбасса, дифференцированных по принципу производственной специализации.

Обычно специалисты описывают кризис как кардинальное переходное состояние, нарушение непрерывности процесса, негативное событие [4], вследствие чего антикризисное управление нацелено на принятие решений по предотвращению такого события. Региональная система антикризисного управления может быть

охарактеризована как совокупность элементов организационной структуры антикризисного менеджмента, ориентированная на диагностику, предупреждение и нейтрализацию финансового дефолта в регионе. Региональная управленческая структура нацелена на мониторинг финансового состояния предприятий и изменения отраслевой структуры народного хозяйства, а также на разработку, освоение и продвижение новых финансовых рычагов и стимулов в управлении. На микроэкономическом уровне система антикризисного управления ориентирована на своевременное профилактическое воздействие посредством диагностики и краткосрочного прогнозирования финансового здоровья предприятия.

Несомненно, финансовая сторона вопроса тесно связана и с оценкой технико-технологических параметров производства. В специальной литературе экономисты оперируют понятиями: финансовое состояние, финансовое положение, финансовое здоровье предприятия. Учитывая общую финансовую составляющую указанных терминов, необходимо разграничить их смысловую нагрузку. При оценке финансового состояния организации по заданным аналитическим векторам (имущественное положение, финансовая устойчивость, ликвидность баланса и платежеспособность) это понятие обычно описывают как характеристику способности компании финансировать свою текущую деятельность [5–8]. Финансовое положение часто интерпретируют как объективную оценку финансовой ситуации на предприятии (в контексте материального положения, качества финансовых отношений, достаточности финансовых ресурсов, наличия материальных и финансовых проблем) [9–12]. Финансовое здоровье означает текущую и перспективную способность компании противостоять вызовам рынка [13, 14]. Финансовое оздоровление в РФ выступает одной из процедур процесса банкротства, применяемых к должнику с целью восстановления его платежеспособности и погашения кредитных обязательств, согласно Федеральному закону от 30.11.1994 № 51-ФЗ и от 26.10.2002 № 127-ФЗ. Таким образом, синтезируя указанные специфические характеристики понятий, акцентируя внимание на их общей финансовой составляющей и опираясь на правовую базу исследований, с определенной долей условности, можно утверждать, что досудебное финансовое оздоровление товаропроизводителей связано с восстановлением платежеспособности субъекта экономики и предотвращением процесса его ликвидации в кризисных обстоятельствах. В качестве ключевых ориентиров (основных направлений) финансового оздоровления целесообразно предусмотреть определение критических полей и предварительную оценку масштабов предкризисного состояния предприятий. Ключевые ориентиры финансового оздоровления как тематически концентрированные линии негативных трендов выявлялись с использованием системы операционных инструментов (совокупности оценочных характеристик риска банкротства (дефолта)), в частности генеральных метрик (базовых численных показателей качества бизнеса).

Цель исследования – выявить и описать ключевые ориентиры финансового оздоровления товаропроизводителей в региональной системе антикризисного управления на базе сконструированной ранее селективно-индикативной модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) компаний [1–3].

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – отдельные процессы, протекающие внутри организаций, и закономерности их функционирования с учетом влияния внешней среды. В качестве предмета исследования рассматриваются ключевые ориентиры финансового оздоровления производителей, выявленные экспресс-диагностикой риска банкротства (дефолта) по материалам сельскохозяйственных предприятий Кемеровской области – Кузбасса (Россия). Теоретико-методологической основой научного исследования определены разработки современных экономистов в сфере теорий банкротства, рисковой прибыли, антикризисного анализа и менеджмента, риск-менеджмента, теории принятия решений. Эмпирический фундамент исследования построен на информационном ресурсе финансовой отчетности организаций за период 2022–2023 гг. Методологический аппарат исследовательской работы отражает разнообразие методов: абстрактно-логического, коэффициентного, динамического, структурного, трендового, сравнительного и др.

Результаты и их обсуждение

Перед началом аналитической работы в заданном направлении представим описание основных шагов ранее проведенных исследований. Во-первых, авторы проводили сравнительный анализ авторских методик прогнозирования вероятности банкротства по признаку структурного устройства методического инструментария, на основе которого выявлены генеральные метрики – директ-индикаторы риска финансового дефолта (ключевые показатели антикризисного анализа, гипотетически обладающие наиболее высокими прогностическими свойствами) и оценен уровень их практической популярности. В процессе изучения генеральные метрики подвергались экономической интерпретации и тематической типизации (фиксации аналитических векторов). С целью экспертизы адекватности выявленных метрик проведена оценка сопряженности экспонентов модели с классическими критериями банкротства (табл. 1) [1–3].

Во-вторых, структурировали риск банкротства (дефолта) организаций, с выделением таких компонентов, как коммерческий риск и риск несбалансированной ликвидности (рис. 1) [2].

Результаты структурного конструирования риска банкротства (дефолта) позволяют алгоритмизировать

Таблица 1. Соответствие набора директ-индикаторов критериям банкротства

Table 1. Direct-indicators vs. bankruptcy criteria

Классические критерии банкротства	Директ-индикаторы банкротства
Асинхронность денежных потоков	Коэффициент деловой активности
Разбалансированность стоимости имущества и обязательств	Коэффициент финансовой независимости
Ненормативный уровень ликвидности баланса	Коэффициент текущей ликвидности
Нерациональное соотношение отдельных статей активов и пассивов баланса	Коэффициент обеспеченности оборотного капитала собственными оборотными средствами
Проблемный финансовый результат деятельности	Показатель экономической рентабельности (убыточности)
Замедление оборачиваемости оборотных средств	Коэффициент мобильности активов



Рисунок 1. Структурные элементы риска банкротства (дефолта) организации

Figure 1. Structural elements of bankruptcy (default) risks

процесс антикризисного менеджмента и использовать структурные компоненты риска в качестве основных рычагов «факторного» управления. Выявление измерителей структурных компонентов рисковой ситуации в рамках экспонентов модели и фиксация сигнальной аналитической базы (источник информации) модели представлены в таблице 2 [1–3].

Так, к метрикам риска несбалансированной ликвидности можно отнести коэффициенты, характеризующие соотношение определенных статей активов и пассивов баланса (k1 – коэффициент текущей ликвидности; k5 – коэффициент обеспеченности оборотного капитала собственными оборотными средствами), а также демонстрирующие структуру активов (k4 – коэффициент мобильности активов) и пассивов (k3 – коэффициент финансовой независимости).

Роль измерителей коммерческого риска, непосредственно связанного с процессом реализации продукции предприятия и обусловленного снижением объемов реализации товаров, могут сыграть соотношения выручки (k2 – коэффициент деловой активности) и чистой прибыли (k6 – показатель экономической рентабельности (убыточности)) со стоимостью имущества предприятия (валютой баланса).

В-третьих, идентифицировали частное долевое участие директ-индикаторов в совокупности параметров модели; определены и обоснованы их критические значения; обеспечена однозначная направленность аналитических векторов; директ-индикаторы систематизированы в диагностическую конструкцию, а также разработана градационная шкала модели. В таблице 3 представлен набор ключевых экспонентов диагностической модели банкротства с описанием их специфики [1–3].

Уравнение рейтинговой экспресс-диагностики риска банкротства (Rb) имеет вид:

$$Rb = 0{,}29410 \times k1 + 0{,}17646 \times k2 + 0{,}14708 \times k3 + 0{,}14708 \times k4 + 0{,}11764 \times k5 + 0{,}11764 \times k6$$

Пороговое значение функции:

$$Rb = 0{,}29410 \times 2 + 0{,}17646 \times 0{,}484 + 0{,}14708 \times 0{,}5 + 0{,}14708 \times 0{,}5 + 0{,}11764 \times 0{,}1 + 0{,}11764 \times 0{,}069 = 0{,}838$$

Если $R < 0{,}838$, возникает повышенный риск банкротства (более 50 %) в краткосрочной перспективе; если $R \geq 0{,}838$, отмечается низкий уровень риска банкротства (менее 50 %).

Практическое применение данной модели в качестве эластичного методического инструмента экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) обеспечивает высокую скорость сигнального анализа и повышает прогностическое качество оценочной процедуры в народно-хозяйственном комплексе России.

Синтезируя вышеизложенную информацию, выдвигаем предположение о том, что система оценочных

параметров (операционных инструментов) риска банкротства (дефолта) может быть представлена пирамидальной структурой (рис. 2) [2, 15–20].

Итак, в вершине пирамиды расположены критерии банкротства, на базе которых, с учетом законодательного формата, выявлены структурные компоненты риска банкротства. В результате тематической типизации зафиксированные директ-индикаторы распределены по аналитическим векторам (ликвидность баланса, эффективность управления, структура имущества и капитала, обеспечение ресурсами). В связи с тем, что каждый вектор включает 1–2 параметра, т. е. рассматривается как более значимый операционный инструмент, он имеет более высокий статус в пирамиде. Генеральные метрики сопряжены и с основными критериями банкротства, и со структурными элементами риска финансового дефолта. Изучение директ-индикаторов с позиции расчетного алгоритма позволило выявить сигнальную аналитическую базу банкротства (абсолютные показатели – «строительный материал» экспонентов модели). В свою очередь, аналитическая база была дифференцирована, и совокупность факторов распалась на два сегмента: факторы предпочтительного роста и предпочтительного снижения. Таким образом, в базисе системы параметров лежат определяющие количественные факторы

Таблица 2. Сопряженность директ-индикаторов и сигнальной аналитической базы со структурными элементами риска банкротства (дефолта)

Table 2. Direct-indicators vs. signal analytical base vs. components of bankruptcy (default) risks

Структурный элемент риска банкротства	Директ-индикатор риска банкротства	Сигнальная аналитическая база	В том числе	
			формальные факторы предпочтительного роста	формальные факторы предпочтительного снижения
Риск несбалансированной ликвидности	k1 – коэффициент текущей ликвидности, ед.	оборотный капитал, краткосрочные обязательства (форма 1)	оборотный капитал	краткосрочные обязательства
	k5 – коэффициент обеспеченности оборотного капитала собственными оборотными средствами, ед.	собственный капитал, внеоборотные активы, оборотный капитал (форма 1)	собственный капитал	внеоборотные активы, оборотный капитал
	k4 – коэффициент мобильности активов, ед.	оборотный капитал, валюта баланса (форма 1)	оборотный капитал	валюта баланса
	k3 – коэффициент финансовой независимости, ед.	собственный капитал, валюта баланса (форма 1)	собственный капитал	валюта баланса
Коммерческий риск	k2 – коэффициент деловой активности, оборотов, ед.	выручка, валюта баланса (формы 1, 2)	выручка	валюта баланса
	k6 – показатель экономической рентабельности (убыточности), ед.	чистая прибыль (убыток), валюта баланса (формы 1, 2)	чистая прибыль	убыток, валюта баланса

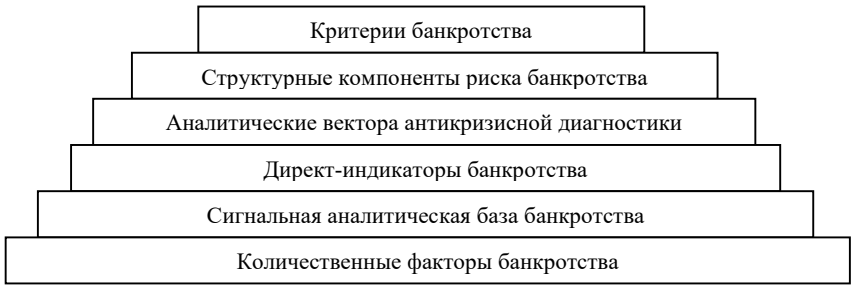


Рисунок 2. Пирамидальная система операционных инструментов оценки риска банкротства (дефолта)

Figure 2. Pyramid of operational tools for bankruptcy (default) risk assessment

Таблица 3. Аналитические характеристики системы директ-индикаторов селективно-индикативной модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) организаций

Table 3. Direct-indicator system of selective-indicative express diagnostics of bankruptcy (default) risks: Analytical characteristics

Аналитические характеристики	Директ-индикаторы модели					
	k1	k2	k3	k4	k5	k6
Уровень популярности экспонента в совокупности параметров, %	45,45	27,27	22,73	22,73	18,18	18,18
Долевое участие экспонента в модели, ед.	0,29410	0,17646	0,14708	0,14708	0,11764	0,11764
Норма, ед. / обоснование	≥ 2,0 / традиционное значение	≥ 0,484 / регионально-отраслевое значение-ориентир*	> 0,5 / традиционное нормативное значение	≥ 0,5 / традиционное нормативное значение	≥ 0,1 / традиционное нормативное значение	≥ 0,069 / регионально-отраслевое значение-ориентир*
Сопряженность с критериями банкротства	критерий ненормативного уровня ликвидности баланса	критерий асинхронности денежных потоков	критерий разбалансированности стоимости имущества и обязательств	критерий замедления оборачиваемости оборотных средств	критерий нерационального соотношения отдельных статей активов и пассивов баланса	критерий проблемного финансового результата деятельности
Аналитический вектор	ликвидность баланса	эффективность управления	структура имущества и капитала	структура имущества и капитала	обеспечение ресурсами	эффективность управления
Измеритель компоненты риска банкротства	измеритель риска несбалансированной ликвидности	измеритель коммерческого риска	измеритель риска несбалансированной ликвидности	измеритель риска несбалансированной ликвидности	измеритель риска несбалансированной ликвидности	измеритель коммерческого риска

Примечание: * – регионально-отраслевые значения-ориентиры показателей рассчитаны за период 2019–2023 гг.

Note: * – regional and industry benchmark values calculated for 2019–2023.

риска банкротства (дефолта), именно их воздействие проецируется на уровень рисковой ситуации. К этому заключению пришли в результате исследовательской работы, основные этапы которой подробно описаны ранее [1–3].

Тестирование диагностической модели проведено на материалах сельскохозяйственных организаций Кемеровской области – Кузбасса, дифференцированных по принципу производственной специализации (смешанное сельское хозяйство (растениеводство и животноводство), птицеводство, свиноводство, рыбоводство, искусственное осеменение сельскохозяйственных животных). Для тестирования модели изучили информационную базу 38 крупных и средних сельскохозяйственных организаций. Статистические данные брали из сервиса Audit-it, сайта Федеральной службы государственной статистики по Кемеровской области, Федеральной службы государственной статистики и из справочника финансовых показателей отраслей Российской Федерации. В результате зафиксировали: (Беловский округ (Б) – 2; Ижморский округ (И) – 3; Кемеровский округ (К) – 5; Крапивинский округ (Кр) – 2; Ленинск-Кузнецкий округ (Л-К) – 3; Новокузнецкий округ (Н) – 5; Прокопьевский округ (Пр) – 1; Промышленновский округ (П) – 7; Топкинский округ (Т) – 1; Тяжинский округ (Тж) – 1; Чебулинский округ (Ч) – 1; Юргинский округ (Ю) – 2; Яйский округ (Я) – 3; Яшкинский (Яш) – 2). Такой уровень выборки предприятий для аналитической работы обусловлен главным образом степенью доступности финансовой отчетности в публичном поле. Расчет финансовых коэффициентов на две последние даты продиктован необходимостью оценки динамики экспонентов модели и рейтингового числа (табл. 4–17).

Согласно результатам анализа (табл. 4), рассматриваемые предприятия имеют различные уровни риска банкротства. Так, показатели предприятия 1 (Н), имеющего свиноводческое направление деятельности, не соответствуют заданному критическому уровню, многие из них имеют негативный тренд. Выявленные проблемы прослеживаются во множестве направлений: ненормативный, снижающийся в динамике уровень ликвидности баланса (k1 = 0,974 в 2022 г.; k1 = 0,720 в 2023 г.); недостаточность собственного капитала, снижающаяся

во времени (k3 = 0,037 в 2022 г.; k3 = 0,103 в 2023 г.); и без того низкий уровень мобильности активов, уменьшающийся в динамике (k4 = 0,379 в 2022 г.; k4 = 0,271 в 2023 г.); отрицательная величина собственного оборотного капитала (ввиду экспансии внеоборотных активов), и, как следствие, отсутствие собственных средств для финансирования оборотных активов (k5 = –1,534 в 2022 г.; k5 = –2,309 в 2023 г.); высокий уровень убыточности активов в 2022 г. и недостаточная степень прибыльности деятельности организации в 2023 г.

Таблица 4. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельных предприятий Новокузнецкого муниципального округа

Table 4. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Novokuznetsk enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
ООО СПК «Чистогорский», пос. Чистогорский (предприятие 1 (Н) – свиноводство)					
k1	≥ 2,0	29,410	0,974	0,720	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,557	0,689	↑
k3	> 0,5	14,708	0,037	0,103	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,379	0,271	↓
k5	≥ 0,1	11,764	–1,534	–2,309	↓
k6	≥ 0,069	11,764	–0,062	0,022	↑
Rb	0,838	100,000	–0,793	0,116	↑
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–
ООО «Кузбасский Бройлер», пос. Металлургов (предприятие 2 (Н) – мясное птицеводство)					
k1	≥ 2,0	29,410	3,283	2,687	↓
k2	≥ 0,484	17,646	1,100	1,115	↑
k3	> 0,5	14,708	0,605	0,609	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,480	0,655	↑
k5	≥ 0,1	11,764	0,179	0,402	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,056	0,088	↑
Rb	0,838	100,000	1,344	1,231	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %↓	–
ООО «СХК Сидоровское», с. Сидорово (предприятие 3 (Н) – молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	22,695	17,536	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,633	0,517	↓
k3	> 0,5	14,708	0,972	0,963	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,613	0,635	↑
k5	≥ 0,1	11,764	0,955	0,942	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,123	0,020	↓
Rb	0,838	100,000	7,146	5,594	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–
ООО «Сосновское», с. Сосновка (предприятие 4 (Н) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	1,229	1,380	↑
k2	≥ 0,484	17,646	0,667	0,689	↑
k3	> 0,5	14,708	0,588	0,600	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,589	0,501	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,185	0,204	↑
k6	≥ 0,069	11,764	–0,011	0,035	↑
Rb	0,838	100,000	0,670	0,714	↑
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–
АО «Кузбасская Птицефабрика», пос. Степной (предприятие 5 (Н) – яичная и мясная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	3,228	2,883	↓
k2	≥ 0,484	17,646	1,067	1,188	↑
k3	> 0,5	14,708	0,589	0,602	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,487	0,604	↑
k5	≥ 0,1	11,764	0,177	0,216	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,019	0,056	↑
Rb	0,838	100,000	3,889	1,223	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–

(k6 = –0,062 и k6 = 0,022 соответственно). Исключение в негативном числовом ряду составляет показатель деловой активности (k2), демонстрирующий сверхнормативное значение и положительную тенденцию в динамике (k2 = 0,557 в 2022 г. и k2 = 0,689 в 2023 г.), которая обусловлена превышением темпов роста выручки над расширением стоимости валюты баланса предприятия. В связи с этим финансовая ситуация в деятельности предприятия 1 (Н) может быть описана как девальвация повышенного уровня риска банкротства, т. к. Rb < 0,838, но стремится к заданной величине (Rb = –0,793 в 2022 г., Rb = 0,116 в 2023 г.). Основной причиной финансовых проблем является недостаточность собственных средств в деятельности экономического субъекта, что влечет за собой отсутствие собственного капитала для осуществления процесса финансирования оборотных активов. Вынужденное привлечение дополнительных средств из внешних источников, которое за этим следует, в свою очередь, воздействует на снижение уровня ликвидности баланса.

У предприятия 2 (Н), специализирующегося на мясном птицеводстве, выявлен незначительный объем проблем: низкая степень мобильности оборотных активов в 2022 г. (k4 = 0,480); недостаточность уровня экономической рентабельности в 2022 г. (k6 = 0,056). Однако следует отметить прибыльный характер функционирования организации и достаточность собственного капитала как фактора, снижающего уровень чувствительности субъекта к финансовым рискам. В этой связи у предприятия 2 (Н) отмечалась ревальвация низкого уровня риска банкротства: Rb > 0,838 (Rb = 1,344 в 2022 г.; Rb = 1,231 в 2023 г.).

Предприятие 3 (Н) занимается молоком и является носителем низкого уровня риска дефолта, который ревальвирован во времени: Rb = 7,146 в 2022 г.; Rb = 5,594 в 2023 г. Предприятие имеет достаточный уровень собственного капитала и финансовой независимости (k3 = 0,972 в 2022 г. и k3 = 0,963 в 2023 г.); высокую мобильность активов (k4 = 0,613 и 0,635 соответственно); прибыльное функционирование (k6 = 0,123 и k6 = 0,020) и высокий градус эффективности производственно-коммерческой деятельности (k2 = 0,633 и k2 = 0,517). Данная организация обеспечивает финансирование оборотных активов за счет собственных средств на 94,2–95,5 % (k5 = 0,955 и k5 = 0,942). Однако выявлены и некоторые уязвимые места: во-первых, многократно снижающийся, ненормативный уровень рентабельности активов в 2023 г. (k6 = 0,020); во-вторых, восьми- и десятикратное превышение нормативного значения коэффициента текущей ликвидности (k1 = 22,695 в 2022 г. и k1 = 17,536 в 2023 г.), что обусловлено мизерной величиной текущих обязательств. На наш взгляд, это следствие высочайшего уровня достаточности собственного капитала у субъекта хозяйствования (97,2 и 96,3 % в 2022–2023 гг. соответственно), что, впрочем, приносит только дополнительные бонусы, снижая уровень чувствительности предприятия к финансовым рискам.

Предприятие 4 (Н), имея зерно-молочную специализацию, выступает носителем повышенного уровня риска банкротства, который девальвирован в динамике: Rb = 0,670 в 2022 г., Rb = 0,714 в 2023 г. Ключевые «кризисные поля» в функционировании предприятия связаны с низкой степенью ликвидности баланса (k1 = 1,229 и k1 = 1,380), убыточной деятельностью в 2022 г. (k6 = –0,011) и недостаточным уровнем рентабельности активов (k6 = 0,035) в 2023 г.

Предприятие 5 (Н) с яичной и мясной специализацией имеет низкий уровень девальвированного риска банкротства: Rb = 3,889 в 2022 г.; Rb = 1,223 в 2023 г. Существенное негативное воздействие на рейтинговое число оказал лишь один показатель с ненормативным уровнем: рентабельность активов по чистой прибыли (k6 = 0,019 в 2022 г. и k6 = 0,056 в 2023 г.). Также в 2022 г. отмечено ненормативное значение показателя мобильности оборотных активов (k4 = 0,487). Коэффициент текущей ликвидности имел снижающееся в динамике сверхнормативное значение (k1 = 3,228 и k1 = 2,883), что обусловлено значительным ростом текущих обязательств предприятия. Нестандартным сверхнормативным значением характеризуется соотношение выручки и стоимости имущества предприятия (k2 = 1,067 и k2 = 1,188). Оборотные активы финансируются за счет собственного капитала на 17,7–21,6 % (k5 = 0,177 и k5 = 0,216).

Предприятие 1 (Пр) имеет зерно-молочную специализацию и низкий уровень риска финансового дефолта в рамках периода 2022–2023 гг.: Rb = 0,870 в 2022 г.; Rb = 1,078 в 2023 г. (табл. 5). Предприятие обладало достаточным объемом собственного капитала для формирования внеоборотных и оборотных активов (k5 = 0,314 и k5 = 0,509). Уровень рентабельности активов по чистой прибыли почти удваивался в течение расчетного периода (k6 = 0,088 в 2022 г. и k6 = 0,151 в 2023 г.). Но в аналитической базе прослеживаются и некоторые уязвимые места: ненормативный уровень коэффициента текущей ликвидности в 2022 г. (k1 = 1,954); недостаточный объем выручки по отношению к стоимости имущества предприятия в 2022–2023 гг. (k2 = 0,475 и k2 = 0,435); нерациональная структура активов баланса в 2022 г. (k4 = 0,451).

Все анализируемые организации округа (табл. 6) имеют зерно-молочную производственную специализацию. Ключевые индикаторы риска банкротства предприятия 1 (П) свидетельствуют о тревожных сигналах в его деятельности на 2022 г. и серьезных финансовых проблемах на 2023 г. В 2022 г. предприятие относилось к носителям низкого уровня риска дефолта, при этом наблюдались нехватка собственного капитала (k3 = 0,353); недостаточность собственных оборотных средств (k5 = 0,007) и низкий уровень рентабельности активов баланса предприятия (k6 = 0,011). Однако сверхнормативный уровень коэффициента текущей

Таблица 5. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельного предприятия Прокопьевского муниципального округа

Table 5. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Prokopyevsk enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
ООО «СХП Михайловское», с. Михайловское (предприятие 1 (Пр) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	1,954	2,522	↑
k2	≥ 0,484	17,646	0,475	0,435	↓
k3	> 0,5	14,708	0,690	0,744	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,451	0,520	↑
k5	≥ 0,1	11,764	0,314	0,509	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,088	0,151	↑
Rb	0,838	100,000	0,870	1,078	↑
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–

Таблица 6. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельных предприятий Промышленновского муниципального округа

Table 6. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Promyshlennaya enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
«КФХ Балбин И. Н.», с. Тарасово (ранее – ООО «Тара») (предприятие 1 (П) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	22,016	1,113	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,978	0,407	↓
k3	> 0,5	14,708	0,353	0,101	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,651	1,000	↑
k5	≥ 0,1	11,764	0,007	0,101	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,011	–0,040	↓
Rb	0,838	100,000	6,793	0,566	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	более 50 %	–
АО «Ваганово», с. Ваганово (предприятие 2 (П) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	0,954	1,239	↑
k2	≥ 0,484	17,646	0,371	0,210	↓
k3	> 0,5	14,708	0,186	0,141	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,366	0,413	↑
k5	≥ 0,1	11,764	–1,216	–1,076	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,009	0,0001	↓
Rb	0,838	100,000	0,212	0,355	↑
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–
ООО «Цветущий», д. Протопопово (предприятие 3 (П) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	1,288	1,517	↑
k2	≥ 0,484	17,646	1,047	1,944	↑
k3	> 0,5	14,708	0,108	0,203	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,922	0,847	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,106	0,060	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,034	0,093	↑
Rb	0,838	100,000	0,727	0,959	↑
Уровень риска банкротства			более 50 %	менее 50 %	–
ООО «МТФ Родная земля», с. Окунево (предприятие 4 (П) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	2,272	2,305	↑
k2	≥ 0,484	17,646	0,229	0,201	↓
k3	> 0,5	14,708	0,083	0,024	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,363	0,315	↓
k5	≥ 0,1	11,764	–1,524	–2,088	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,060	–0,033	↓
Rb	0,838	100,000	0,959	0,513	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	более 50 %	–

Продолженине таблицы 6

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
АО «Ударник Полей», пгт. Промышленная (предприятие 5 (П) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	3,081	1,611	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,076	0,112	↑
k3	> 0,5	14,708	–0,001	–0,155	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,375	0,324	↓
k5	≥ 0,1	11,764	–1,669	–2,561	↓
k6	≥ 0,069	11,764	–0,051	–0,154	↓
Rb	0,838	100,000	0,743	0,198	↓
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–
ООО «Лебеди», с. Лебеди (предприятие 6 (П) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	1,269	4,660	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,686	0,602	↓
k3	> 0,5	14,708	0,020	0,016	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,852	0,875	↑
k5	≥ 0,1	11,764	–0,152	–0,124	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,002	0,001	↓
Rb	0,838	100,000	0,604	1,605	↑
Уровень риска банкротства			более 50 %	менее 50 %	–
ООО «Темп», пгт. Промышленная (предприятие 7 (П) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	1,332	1,699	↑
k2	≥ 0,484	17,646	1,500	1,444	↓
k3	> 0,5	14,708	0,202	0,226	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,576	0,641	↑
k5	≥ 0,1	11,764	–0,383	–0,205	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,047	0,074	↑
Rb	0,838	100,000	0,728	0,770	↑
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–

ликвидности (k1 = 22,016), который имеет максимальное долевое участие в формировании рейтингового числа, в значительной степени нивелировал указанные проблемы. Но, это, скорее, исключение из правила, нежели закономерное влияние параметра на результат, т. к. такой невероятный уровень указанного экспонента модели встречается в функционировании организаций крайне редко. В данном случае он объясняется несопоставимыми с величиной оборотного капитала суммами краткосрочных обязательств. В 2022 г. рейтинговая оценка составила: Rb = 6,793, что свидетельствовало о низком уровне риска дефолта. В 2023 г. финансовое здоровье предприятия отяготилось проблемами по большинству аналитических векторов: ненормативный уровень коэффициента текущей ликвидности (k1 = 1,113); нерациональное соотношение выручки и стоимости имущества предприятия (k2 = 0,407); катастрофическая недостаточность собственного капитала (k3 = 0,101, при норме: > 0,500), который используется только для формирования оборотных фондов предприятия (в 2023 г. внеоборотные активы в балансе отсутствовали); убыточность активов (k6 = –0,040). Рейтинговое число сократило значение в 2023 г. более чем в 12 раз и демонстрировало повышенный уровень риска банкротства предприятия: Rb = 0,566. Таким образом, в динамике прослеживалась трансформация низкого уровня риска в высокую вероятность банкротства предприятия.

Все финансовые показатели предприятия 2 (П) не соответствовали заданным пороговым значениям в рамках расчетного периода. Кризисные поля выявлены в сферах всех рисковых индикаторов: ненормативная, но растущая в динамике степень ликвидности баланса (k1 = 0,954 в 2022 г. и k1 = 1,239 в 2023 г.); недостаточный, снижающийся во времени уровень оборачиваемости активов баланса (k2 = 0,371 в 2022 г. и k2 = 0,210 в 2023 г.); растущая в динамике значительная нехватка собственных средств (k3 = 0,186 в 2022 г. и k3 = 0,143 в 2023 г.); низкий, но стремящийся к норме уровень мобильности оборотных активов (k4 = 0,366 и k4 = 0,413 соответственно); отрицательный размер собственного оборотного капитала и необеспеченность оборотных активов данным источником финансирования (k5 = –1,216 и –1,076); падающий ненормативный уровень рентабельности активов (k6 = 0,0090 в 2022 г. и k6 = 0,0001 в 2023 г.). Основные кризисные точки в функционировании предприятия обусловлены недостаточностью собственного капи-

тала, нерациональной структурой активов, огромными массивами краткосрочных обязательств. Так, в деятельности предприятия 2 (П) прослеживалась девальвация повышенного уровня риска банкротства, т. к. Rb < 0,838 (Rb = 0,212 в 2022 г.; Rb = 0,355 в 2023 г.).

Финансовые показатели предприятия 3 (П) свидетельствовали о повышенном уровне риска дефолта в 2022 г. и снижении опасности рисковой ситуации в 2023 г. В 2022 г. на результаты расчетов повлияли значения следующих параметров: недостаточный уровень ликвидности баланса (k1 = 1,288); кризисный размер достаточности собственного капитала (k3 = 0,108); низкая величина прибыльности активов предприятия (k6 = 0,034). В 2023 г. финансовое здоровье предприятия укреплялось, согласно выросшим в динамике значениям экспонентов модели: рост коэффициента текущей ликвидности (k1 = 1,517), который, тем не менее, не достигал нормативного порога; существенное увеличение соотношения выручки и стоимости имущества предприятия (k2 = 1,944); удвоение показателя финансовой независимости (k3 = 0,203), но еще далекого от норм; высокий уровень мобильности активов (k4 = 0,847), говорящий о материалоемком производстве; сверхнормативный уровень рентабельности активов предприятия (k6 = 0,093). Воздействие кризисных полей (ликвидность баланса – k1, структура капитала – k3, обеспеченность собственными оборотными средствами – k5) на рейтинговое число риска банкротства нивелировалось многократным превышением нормальных значений у параметров k2 и k6. Таким образом, в динамике наблюдалась трансформация повышенного риска банкротства в 2022 г. в низкий уровень рисковой ситуации с позиции финансового здоровья компании в 2023 г. (Rb = 0,727 в 2022 г.; Rb = 0,959 в 2023 г.).

В деятельности предприятия 4 (П) зафиксировано ухудшение финансовой ситуации. В течение расчетного периода выявлены проблемы по большинству аналитических направлений: недостаточный уровень эффективности коммерческой деятельности, выражающийся в соотношении объема выручки и стоимости имущества предприятия (k2 = 0,229 в 2022 г. и 0,201 в 2023 г.); недопустимая доля собственных средств в совокупном капитале предприятия (k3 = 0,083 в 2022 г. и 0,024 в 2023 г.); низкая, снижающаяся во времени, мобильность активов баланса (k4 = 0,363 в 2022 г. и 0,315 в 2023 г.); отрицательная величина собственного оборотного капитала, растущая в динамике (k5 = –1,524 и –2,088 соответственно); малый уровень рентабельности активов в 2022 г. (k6 = 0,060) и убыточная деятельность в 2023 г. (k6 = –0,033). Только коэффициент текущей ликвидности имеет нормальное значение (k1 = 2,272 в 2022 г. и 2,305 в 2023 г.), ввиду незначительных объемов краткосрочных обязательств предприятия в текущем периоде. Однако один фактор с положительным влиянием на рейтинг (против пяти факторов негативного воздействия) не смог изменить общую картину: зафиксирован повышенный уровень риска банкротства (Rb = 0,601 в 2022 г.; Rb = 0,513 в 2023 г.).

Предприятие 5 (П) также имело слабое финансовое здоровье, отягощенное проблемами во всех аналитических сегментах (за исключением ликвидности баланса в 2022 г.), и повышенный уровень риска дефолта. Конфликтные места в функционировании предприятия следующие: недопустимый уровень эффективности коммерческой деятельности и деловой активности компании (k2 = 0,076 в 2022 г. и 0,112 в 2023 г.); наличие и рост нераспределенного убытка в структуре капитала предприятия (k3 = –0,001 и –0,155 соответственно); низкий уровень мобильности активов, а именно k4 = 0,375 и 0,324; отрицательная величина оборотного капитала, растущая в динамике (k5 = –1,669 и –2,561); убыточная деятельность предприятия в 2022–2023 гг. и увеличивающиеся убытки во времени (k6 = –0,051 и –0,154). Следовательно, в динамике наблюдалась ревальвация повышенного риска дефолта: Rb = 0,743 в 2022 г.; Rb = 0,198 в 2023 г.

У предприятия 6 (П) отмечено финансовое оздоровление в течение 2022–2023 гг. Причем в начале расчетного периода наблюдались проблемы по большинству аналитических векторов: низкий уровень текущей ликвидности баланса (k1 = 1,269); недостаточность собственного капитала (k3 = 0,020); отрицательная величина собственного оборотного капитала с невозможностью обеспечить оборотные фонды собственным финансированием (k5 = –0,152); неприемлемый уровень прибыльности производства (k6 = 0,002). Так, в 2022 г. предприятие являлось носителем повышенного уровня риска дефолта: Rb = 0,604. В конце периода отмечен кратный рост коэффициента текущей ликвидности (k1 = 4,660), что обнулило и проблемы нерациональной структуры капитала, и низкого уровня прибыльности деятельности предприятия, и невозможности финансирования оборотных фондов за счет собственных ресурсов. Добавим к этому фактору высокий уровень эффективности коммерческой деятельности (k2 = 0,686 и 0,602) и сверхнормативное значение мобильности активов (k4 = 0,852 и k5 = 0,875). В результате данное предприятие могло считаться носителем низкого уровня риска дефолта: Rb = 1,605.

Кризисные поля в функционировании предприятия 7 (П) расположены в нескольких аналитических сегментах: ненормативный уровень текущей ликвидности баланса (k1 = 1,332 в 2022 г. и 1,699 в 2023 г.); недостаточность собственного капитала (k3 = 0,202 и 0,226 соответственно); отрицательная величина собственных оборотных средств, говорящая об отсутствии собственных ресурсов для финансирования оборотных фондов (k5 = –0,383 и –0,205). Кроме того, в 2022 г. наблюдалась низкая степень прибыльности активов предприятия (k6 = 0,047). Наличие значительных финансовых проблем трансформировалось

в повышенный риск банкротства, который, впрочем, девальвировался во времени: Rb = 0,728 в 2022 г. и Rb = 0,770 в 2023 г.

Предприятие 1 (К), специализирующееся на овощеводческой и зерно-молочной промышленностях (табл. 7), имело устойчивое финансовое положение на рынке сельскохозяйственной продукции: высокий уровень ликвидности баланса (k1 = 2,940 в 2022 г. и 3,482 в 2023 г.); высший класс деловой активности (k2 = 0,682 и 0,603 соответственно); устойчивую достаточность собственного капитала (k3 = 0,759 и 0,790); соблюдение заданного порога мобильности активов

Таблица 7. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельных предприятий Кемеровского муниципального округа

Table 7. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Kemerovo enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
СПК «Береговой», д. Береговая (предприятие 1 (К) – выращивание овощей, зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	2,940	3,482	↑
k2	≥ 0,484	17,646	0,682	0,603	↓
k3	> 0,5	14,708	0,759	0,790	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,504	0,495	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,522	0,578	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,105	0,028	↓
Rb	0,838	100,000	1,242	1,388	↑
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–
ООО «Кемеровская инкубационно-птицеводческая станция», пос. Ясногорский (предприятие 2 (К) – птицеводство)					
k1	≥ 2,0	29,410	1,975	2,102	↑
k2	≥ 0,484	17,646	3,248	3,416	↑
k3	> 0,5	14,708	0,539	0,572	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,909	0,899	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,493	0,437	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,093	0,101	↑
Rb	0,838	100,000	1,432	1,498	↑
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–
ООО «СХО Заречье», пос. Новостройка (предприятие 3 (К) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	0,153	0,053	↓
k2	≥ 0,484	17,646	1,270	0,369	↓
k3	> 0,5	14,708	–5,318	–17,841	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,971	1,000	↑
k5	≥ 0,1	11,764	–5,502	–17,841	↓
k6	≥ 0,069	11,764	–3,216	–1,965	↑
Rb	0,838	100,000	–1,397	–4,263	↓
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–
ООО «Селяна», пос. Кузбасский (предприятие 4 (К) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	0,400	0,282	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,294	0,343	↑
k3	> 0,5	14,708	0,141	0,136	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,220	0,159	↓
k5	≥ 0,1	11,764	–2,886	–4,399	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0, 00001	0,00001	–
Rb	0,838	100,000	–0,119	–0,332	–
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–
АО «Кемеровоплем», пос. Ясногорский (предприятие 5 (К) – искусственное осеменение с/х животных)					
k1	≥ 2,0	29,410	25,392	17,657	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,619	0,710	↑
k3	> 0,5	14,708	0,954	0,938	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,729	0,763	↑
k5	≥ 0,1	11,764	0,936	0,919	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,020	–0,053	↓
Rb	0,838	100,000	7,935	5,668	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–

(k4 = 0,504 в 2022 г.) или максимальное приближение к нему (k4 = 0,495 в 2023 г.); высокий стандарт финансирования оборотных фондов за счет собственных источников (k5 = 0,522 и 0,578); прибыльное производство продукции (k6 = 0,105 и 0,028). Но присутствовало и падение уровня рентабельности активов организации в 2023 г., которое, впрочем, не привело к негативным последствиям с позиции ее финансового состояния. Отсутствие существенных финансовых проблем положительно отразилось на рейтинговом числе: Rb = 1,242 в 2022 г. и 1,388 в 2023 г. Таким образом, зафиксирована девальвация низкого риска дефолта в течение расчетного периода.

Птицеводческое предприятие 2 (К) являлось носителем минимального уровня риска финансового дефолта: Rb = 1,432 в 2022 г. и 1,498 в 2023 г. Прослеживалась девальвация и без того низкого уровня рисковой ситуации. Однако коэффициент текущей ликвидности стремился к нормативному значению в 2022 г. (k1 = 1,975) и достигал его в 2023 г. (k1 = 2,102); уровень достаточности собственных ресурсов предприятия находился в пределах нормы (k3 = 0,539 и 572,000); мобильность активов высока и демонстрировала абсолютное подавление внеоборотных активов оборотным капиталом в структуре (k4 = 0,909 и 0,899); собственный оборотный капитал достаточен для финансирования текущей деятельности предприятия (k5 = 0,493 и 0,437); уровень рентабельности активов значителен и превышает значение ориентир в полтора раза (k6 = 0,093 и 0,101). Отдельно отметим рассчитанный уровень показателя деловой активности, отражающий соотношение выручки и стоимости имущества предприятия, который в 6,0–6,5 раз превышал заданное значение экспонента модели (k2 = 3,248 в 2022 г. и 3,416 в 2023 г.). Предположительно, именно этот коэффициент оказал решающее воздействие на рейтинг платежеспособности птицефабрики.

Финансовое здоровье предприятия 3 (К), имеющего зерно-молочную специализацию, отягощено множеством кризисных обстоятельств: недостаточный уровень текущей ликвидности баланса, снижающийся в динамике (k1 = 0,153 в 2022 г. и 0,053 в 2023 г.); низкая деловая активность предприятия в 2023 г. (k2 = 0,369); огромные массивы нераспределенных убытков текущего года и прошлых лет (k3 = –5,318 и –17,841 соответственно); отрицательная величина собственного оборотного капитала (k5 = –5,502 и –17,841); катастрофический уровень убытков по отношению к совокупным активам предприятия (k6 = –3,216 и –1,965). Только степень мобильности активов условно соответствовала заданным требованиям и говорила о незначительной доле внеоборотных активов в структуре в 2022 г. (k4 = 0,971) и об их отсутствии в 2023 г. (k4 = 1,000). В таких условиях очевидно, что предприятие являлось носителем максимального уровня риска финансового дефолта, возрастающего со временем: Rb = –1,397 в 2022 г. и –4,263 в 2023 г.

Предприятие 4 (К) с зерно-молочной специализацией испытывало серьезные проблемы во всех диагностических секторах: недостаточная, снижающаяся в динамике ликвидность баланса (k1 = 0,400 в 2022 г. и 0,282 в 2023 г.); низкая деловая активность (k2 = 0,294 и 0,343); недопустимый уровень доли собственных средств в совокупном капитале (k3 = 0,141 и 0,136); нерациональная структура активов (k4 = 0,220 и 0,159); растущая во времени отрицательная величина собственного оборотного капитала (k5 = –2,886 в 2022 г. и –4,399); минимальный уровень рентабельности активов (k6 = 0,00001 в 2022–2023 гг.). В результате кризисных явлений в экономике предприятия уровень риска финансового дефолта очень высок, более того, ситуация ухудшилась к концу 2023 г. В этих обстоятельствах не вызывает сомнения тот факт, что предприятие является носителем максимального уровня риска банкротства, возрастающего в динамике: Rb= –0,119 в 2022 г. и –0,332 в 2023 г.

Предприятие 5 (К), специализирующееся на искусственном осеменении сельскохозяйственных животных, испытывало незначительный риск финансового дефолта, что можно заключить на основе рейтинговых чисел экономико-математической модели: Rb = 7,935 в 2022 г. и 5,668 в 2023 г. В большей степени на рейтинг оказали влияние коэффициенты текущей ликвидности (k1 = 25,392 в 2022 г. и 17,657 в 2023 г.), многократно превышающие нормативное значение (≥ 2,0). Кроме того, у предприятия наблюдался низкий уровень чувствительности к рыночным рискам, т. к. доля собственных средств в совокупном капитале составляла: 95,4 % в 2022 г. и 93,8 % в 2023 г. Негативное воздействие на рейтинговое число оказал лишь показатель рентабельности (убыточности) активов: k6 = 0,020 в 2022 г. и –0,053 в 2023 г. Но даже убыточная деятельность предприятия в конце расчетного периода не повлияла на результат, что объясняется большим запасом финансовой прочности со стороны сверхнормативного уровня коэффициента текущей ликвидности.

Финансовое здоровье птицеводческого предприятия 1 (Б) (табл. 8) говорило о кризисных явлениях в области следующих сегментов: текущая ликвидность баланса (k1 = 0,307 в 2022 г. и 0,627 в 2023 г.); структура капитала и недостаточность собственных ресурсов (k3 = 0,157 и 0,179 соответственно); фондоемкое производство и низкий уровень мобильности активов (k4 = 0,220 и 0,228); отрицательная величина собственного оборотного капитала (k5 = –2,823 и –2,586). Рейтинговое число свидетельствовало о повышенном уровне риска банкротства в деятельности предприятия: Rb = –0,056 в 2022 г. и 0,060 в 2023 г. Положительное воздействие на рейтинг оказывал только один фактор: высокий уровень деловой активности (k2 = 0,727 и 0,680).

Рыбоводческое предприятие 2 (Б) имело отличные финансовые характеристики. На первый взгляд, вызы-

Таблица 8. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельных предприятий Беловского муниципального округа

Table 8. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Belovo enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
ООО «ППФ Снежинская», пос. Снежинский (предприятие 1 (Б) – птицеводство)					
k1	≥ 2,0	29,410	0,307	0,627	↑
k2	≥ 0,484	17,646	0,727	0,680	↓
k3	> 0,5	14,708	0,157	0,179	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,220	0,228	↑
k5	≥ 0,1	11,764	–2,823	–2,586	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,033	0,023	↓
Rb	0,838	100,000	–0,056	0,060	↑
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–
ООО «Беловское рыбное хозяйство», пгт. Инской (предприятие 2 (Б) – рыбоводство)					
k1	≥ 2,0	29,410	98,278	39,076	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,782	0,864	↑
k3	> 0,5	14,708	0,991	0,997	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,849	0,865	↑
k5	≥ 0,1	11,764	0,989	0,974	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,235	0,252	↑
Rb	0,838	100,000	29,458	12,060	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–

Таблица 9. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельного предприятия Топкинского муниципального округа

Table 9. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Topki enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
ООО «Зерноград», с. Зарубино (предприятие 1 (Т) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	5,022	16,078	↑
k2	≥ 0,484	17,646	2,153	1,108	↓
k3	> 0,5	14,708	0,800	0,937	↑
k4	≥ 0,5	14,708	1,000	1,000	–
k5	≥ 0,1	11,764	0,800	0,937	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,278	0,194	↓
Rb	0,838	100,000	2,265	5,339	↑
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–

вали сомнение и удивление коэффициенты текущей ликвидности (k1 = 98,278 в 2022 г., 39,076 в 2023 г.), что объяснялось небольшими размерами краткосрочных обязательств организации в условиях доминирования оборотных активов в структуре имущества (k4 = 0,849 и 0,865). Уровень достаточности собственного капитала очень высок (k3 = 0,991 и 0,997). Сверхнормативное значение показателя деловой активности предприятия усиливалось в динамике (k2 = 0,782 и 0,864). Огромные массивы собственных финансовых ресурсов позволяли финансировать оборотные фонды на 98,9 % в 2022 г. и 97,4 % в 2023 г. (k5 = 0,989 и 0,974). Следствием отсутствия финансовых проблем в деятельности организации являлся высокий уровень рентабельности активов, растущий во времени (k6 = 0,235 и 0,252), несмотря на сложную рыночную конъюнктуру в новейшей истории России. Таким образом, предприятие относилось к носителям минимального уровня риска финансового дефолта: Rb = 29,458 в 2022 г. и 12,060 в 2023 г.

Предприятие 1 (Т) с зерно-молочной специализацией (табл. 9) показало в расчетном периоде отличные результаты финансовой деятельности: многократно превышающий норму коэффициент текущей ликвидности (k1 = 5,022 в 2022 г. и 16,078 в 2023 г.); сверхнормативный уровень показателя деловой активности (k2 = 2,153 и 1,108); высочайший уровень достаточности собственного капитала (k3 = 0,800 и 0,937); максимальная степень мобильности активов (k4 = 1,000 и 1,000), что объясняется отсутствием внеоборотных активов у предприятия; высший уровень обеспеченности оборотных активов собственными

источниками финансирования (k5 = 0,800 и 0,937); кратно превышающий ориентировочное значение уровень рентабельности активов баланса предприятия, но снижающийся в динамике (k6 = 0,278 и 0,194). По причине сверхнормативных значений экспонентов диагностической модели предприятие 1 (Т) являлось носителем низкого уровня риска финансового дефолта, который девальвирован во времени: Rb = 2,265 в 2022 г. и 5,339 в 2023 г.

Все анализируемые организации округа (табл. 10) имели зерно-молочную производственную специализацию. Предприятие 1 (И) испытывало повышенный риск банкротства, который усиливал свое воздействие на деятельность организации: Rb = 0,453 в 2022 г. и 0,160 в 2023 г. Основные причины сложившейся финансовой ситуации: ненормативный, снижающийся в динамике уровень текущей ликвидности баланса (k1 = 0,585 в 2022 г. и 0,351 в 2023 г.); недопустимое значение коэффициента финансовой независимости, хоть и кратно возросшее во времени (k3 = 0,048 и 0,201); превалирование кредиторской задолженности в структуре источников финансирования деятельности предприятия; нормативная величина показателя мобильности активов в 2022 г. (k4 = 0,556) и ее падение в 2023 г. (k4 = 0,280), что свидетельствовало об усилении удельной позиции внеоборотных активов в структуре активов баланса организации; следствием недостаточности собственных средств и нерациональной структуры активов явилась отрицательная величина собственного оборотного капитала (k5 = –0,707 и –1,844); уровень прибыльности активов в 2022 г. не достигал ориентировочного значения (k6 = 0,006), а в 2023 г. немного его превышал (k6 = 0,079). Единственным фактором, положительно повлиявшим на рейтинговое число, стал коэффициент деловой активности, отражающий соотношение выручки и стоимости имущества организации (k2 = 0,626 в 2022 г. и 1,101 в 2023 г.). Однако это влияние осталось незаметным в оценке общей финансовой ситуации.

Предприятие 2 (И) характеризовалось различными финансовыми рейтингами в расчетном периоде. Если в 2022 г. проявлялся повышенный уровень риска банкротства организации (Rb = 0,783), то в 2023 г. ее финансовое здоровье укрепилось (Rb = 1,175), а высокорисковая ситуация трансформировалась в стандартные финансовые обстоятельства. Основными проблем-

Таблица 10. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельных предприятий Ижморского муниципального округа

Table 10. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Izhmorka enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
ООО «ФХ ИжморВодСтрой», с. Святославка (предприятие 1 (И) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	0,585	0,351	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,626	1,101	↑
k3	> 0,5	14,708	0,048	0,201	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,556	0,280	↓
k5	≥ 0,1	11,764	–0,707	–1,844	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,006	0,079	↑
Rb	0,838	100,000	0,453	0,160	↓
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–
СПК «Северный», с. Колыон (предприятие 2 (И) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	1,463	1,722	↑
k2	≥ 0,484	17,646	0,948	2,820	↑
k3	> 0,5	14,708	0,455	0,512	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,760	0,854	↑
k5	≥ 0,1	11,764	0,316	0,429	↑
k6	≥ 0,069	11,764	–0,239	–0,664	↓
Rb	0,838	100,000	0,783	1,125	↑
Уровень риска банкротства			более 50 %	менее 50 %	–
ООО «Крестьянское Хозяйство», с. Воскресенка (предприятие 3 (И) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	–	–	–
k2	≥ 0,484	17,646	0,207	0,278	↑
k3	> 0,5	14,708	1,000	1,000	–
k4	≥ 0,5	14,708	0,448	0,615	↑
k5	≥ 0,1	11,764	1,000	0,999	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,001	–0,061	↓
Rb	0,838	100,000	0,365*	0,396*	↑
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–

ными местами в деятельности предприятия были: ненормативный, но стремящийся к заданной величине, уровень ликвидности баланса (k1 = 1,463 в 2022 г. и 1,722 в 2023 г.); недостаточность собственного капитала в 2022 г. (k3 = 0,455); убыточная деятельность организации в течение периода 2022–2023 гг. (k6 = –0,239 и –0,664 соответственно). Стоит отметить также и ряд сверхнормативных параметров, которые, видимо, и определили значения рейтинговых чисел: высочайший уровень деловой активности (k2 = 0,948 и 2,820); достаточность собственных средств в 2023 г. (k3 = 0,512); высокая мобильность оборотных активов (k4 = 0,760 и 0,854); положительный размер собственного оборотного капитала и его рост в динамике (k5 = 0,316 и 0,429).

Предприятие 3 (И) имело стабильно тяжелое финансовое положение, и, как следствие, повышенный риск банкротства: Rb = 0,365 в 2022 г. и 0,396 в 2023 г. В первую очередь необходимо отметить недостаточный уровень прибыльности активов в 2022 г. (k6 = 0,001) и убыточную деятельность организации в 2023 г. (k6 = –0,061). Следует обратить внимание и на нестандартные обстоятельства в деятельности организации: отсутствие краткосрочных обязательств (в том числе, кредиторской задолженности), а, следовательно, невозможность расчета коэффициента текущей ликвидности (k1); отсутствие долгосрочных обязательств, что снижало возможности предприятия расширять свой финансовый потенциал и повышать экономическую рентабельность деятельности; абсолютное доминирование собственного капитала в структуре источников финансирования (k3 = 1,000 и 1,000); очень низкий уровень деловой активности (k2 = 0,207 и 0,278); нестабильная структура активов баланса, колеблющаяся то в сторону внеоборотных активов, то в пользу оборотных средств (k4 = 0,448 и 0,615); абсолютные возможности предприятия финансировать оборотные активы за счет собственных средств (k5 = 1,000 и 0,999). В связи с этим невозможность расчета коэффициента текущей ликвидности и значительное влияние негативных факторов на рейтинговое число привели к соответствующей характеристике финансового здоровья предприятия.

Финансовое здоровье предприятия 1 (Кр) с зерномолочной специализацией (табл. 11) отягощено некоторыми финансовыми проблемами: недостаточное, снижающееся во времени, значение коэффициента текущей ликвидности (k1 = 1,659 в 2022 г. и 1,421 в 2023 г.); незначительный уровень прибыльности активов в 2022 г. (k6 = 0,001) и убыточная деятельность в 2023 г. (k6 = –0,148). Результаты расчетов по другим аналитическим векторам некритичны: нормальный, но снижающийся во времени уровень показателя деловой активности (k2 = 0,594 и 0,570); достаточный, но имеющий негативную динамику размер собственного капитала (k3 = 0,642 и 0,576); мобильная, повышающая скорость обращения, структура активов баланса предприятия (k4 = 0,593 и 0,602); положительная, но скользящая вниз сверхнормативная величина собственного оборотного капитала (k5 = 0,397 и 0,296). Таким образом, финансовая ситуация на предприятии может быть охарактеризована как ревальвация

Таблица 11. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельных предприятий Крапивинского муниципального округа

Таблица 11. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Krapivino enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
ООО «Барачатское», с. Барачаты (предприятие 1 (Кр) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	1,659	1,421	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,594	0,570	↓
k3	> 0,5	14,708	0,642	0,576	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,593	0,602	↑
k5	≥ 0,1	11,764	0,397	0,296	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,001	–0,148	↓
Rb	0,838	100,000	0,818	0,706	↓
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–
ООО «Агрохолдинг Кузбасский», с. Борисово (предприятие 2 (Кр) – молочная-мясная-зерновая специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	1,751	1,379	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,689	0,643	↓
k3	> 0,5	14,708	0,626	0,604	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,416	0,373	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,102	–0,059	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,112	0,087	↓
Rb	0,838	100,000	0,812	0,664	↓
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–

повышенного риска банкротства: Rb = 0,818 в 2022 г. и 0,706 в 2023 г.

Предприятие 2 (Кр) с молочно-мясной и зерновой специализацией являлось носителем повышенного уровня риска финансового дефолта, который прогрессировал во временном аспекте: Rb = 0,812 в 2022 г. и 0,664 в 2023 г. Если в 2022 г. рейтинговое число было близко к пороговой величине, то в 2023 г. отслеживалось значительное удаление от нее. К ухудшению финансового здоровья предприятия привели следующие обстоятельства: снижение ненормативной величины коэффициента текущей ликвидности (k1 = 1,751 в 2022 г. и 1,379 в 2023 г.); сокращение деловой активности организации на рынке (k2 = 0,689 и 0,643); понижение нормального уровня достаточности собственного капитала (k3 = 0,626 и 0,604); падение и без того недостаточной величины мобильности активов (k4 = 0,416 и 0,373); отрицательное значение собственного оборотного капитала в 2023 г. (k5 = –0,059); снижающаяся во времени нормальная величина рентабельности активов баланса (k6 = 0,112 и 0,087).

Предприятие 1 (Л-К), специализирующееся на зерновой и молочной продукции (табл. 12), характеризовалось повышенным уровнем риска финансового дефолта, который девальвирован в динамике: Rb = 0,532 в 2022 г. и 0,700 в 2023 г. Финансовая ситуация устремлена к исправлению, о чем свидетельствовали следующие обстоятельства: рост ненормативного значения коэффициента текущей ликвидности (k1 = 0,990 в 2022 г. и 1,140 в 2023 г.); существенное увеличение деловой активности организации (k2 = 0,721 и 1,225), которая кратно превышала значение-ориентир; повышение степени мобильности активов (k4 = 0,635 и 0,824); получение положительной, но ненормативной, величины собственного оборотного капитала в 2023 г. (k5 = 0,011), по сравнению с негативной ситуацией в предыдущем периоде (k5 = –0,154). Прослеживались и негативные тенденции: снижение ненормативного уровня достаточности собственного капитала (k3 = 0,266 в 2022 г. и 0,185 в 2023 г.); сокращение прибыльности активов баланса организации (k6 = 0,005 и 0,002).

Предприятие 2 (Л-К) с зерно-молочной специализацией имело устойчивое финансовое положение на рынке и испытывало низкий уровень риска банкротства, повышающегося во времени (Rb = 1,976 в 2022 г. и 1,348 в 2023 г.). Снижение рейтингового числа объяс-

Таблица 12. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельных предприятий Ленинск-Кузнецкого муниципального округа

Table 12. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Leninsk-Kuznetskiy enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
ООО «Сельхозагро-Сервис», с. Ариничево (предприятие 1 (Л-К) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	0,990	1,140	↑
k2	≥ 0,484	17,646	0,721	1,225	↑
k3	> 0,5	14,708	0,266	0,185	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,635	0,824	↑
k5	≥ 0,1	11,764	–0,154	0,011	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,005	0,002	↓
Rb	0,838	100,000	0,532	0,700	↑
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–
СХА (колхоз) «Заря», с. Шабаново (предприятие 2 (Л-К) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	5,472	3,456	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,776	0,710	↓
k3	> 0,5	14,708	0,705	0,660	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,478	0,500	↑
k5	≥ 0,1	11,764	0,383	0,321	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,112	0,001	↓
Rb	0,838	100,000	1,976	1,348	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–
ООО «ПЗ Ленинск-Кузнецкий», с. Подгорное (предприятие 3 (Л-К) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	8,513	6,009	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,330	0,211	↓
k3	> 0,5	14,708	0,760	0,701	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,491	0,461	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,513	0,358	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,003	–0,308	↓
Rb	0,838	100,000	2,804	1,980	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–

нялось в первую очередь падением уровня рентабельности активов (с 0,112 до 0,001 ед.). Менее значительное понижение отмечено в динамике по следующим векторам: текущая ликвидность (k1 = 5,472 в 2022 г. и 3,456 в 2023 г.); деловая активность (k2 = 0,776 и 0,710); достаточность собственного капитала (k3 = 0,705 и 0,660); собственный оборотный капитал (k5 = 0,383 и 0,321). Только степень мобильности активов повышалась во времени и достигала нормативного значения (k4 = 0,478 и 0,500).

Предприятие 3 (Л-К) с зерно-молочной специализацией характеризовалось ревальвацией минимального уровня риска финансового дефолта: Rb = 2,804 в 2022 г. и 1,980 в 2023 г. Основными проблемными местами в деятельности предприятия являлись низкая деловая активность, снижающаяся в динамике (k2 = 0,330 в 2022 г. и 0,211 в 2023 г.); недостаточная мобильность активов (k4 = 0,491 и 0,461); низкий уровень рентабельности активов в 2022 г. (k6 = 0,003) и убыточность деятельности в 2023 г. (k6 = –0,308). Но значительная величина коэффициента текущей ликвидности (k1 = 8,513 и 6,009); сверхнормативный уровень достаточности собственного капитала (k3 = 0,760 и 0,701) и широкие возможности предприятия финансировать оборотные активы за счет собственных источников (k5 = 0,513 и 0,358) нивелировали указанные проблемы.

Финансовое положение предприятия 1 (Тж) с зерно-молочным производственным направлением (табл. 13) можно описать как ревальвацию низкого уровня риска банкротства: Rb = 11,753 в 2022 г. и 6,217 в 2023 г. Нельзя сказать, что у компании имелись ярко выраженные проблемы, но присутствовали некоторые нездоровые финансовые проявления: снижение деловой активности до ненормативного уровня в 2023 г. (k2 = 0,462) и кратное сокращение уровня рентабельности активов в 2023 г. (k2 = 0,024). Остальные экспоненты модели имели сверхнормативные значения, а коэффициент текущей ликвидности даже многократно превышал нормативный уровень (k1 = 38,478 и 19,816).

Предприятие 1 (Ч) с зерно-молочной специализацией (табл. 14) являлось носителем максимального уровня риска банкротства и испытывало множество финансовых проблем: снижение ненормативного значения коэффициента текущей ликвидности (k1 = 1,171 в 2022 г. и 0,946 в 2023 г.); сокращение ненормативного значения показателя деловой активности (k2 = 0,385 и 0,228); недостаточность собственного капитала, сокращающаяся во времени (k3 = 0,104 и 0,473); низкая

Таблица 13. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельного предприятия Тяжинского муниципального округа

Table 13. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Tyazhin enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
СПК «Пичугинский», с. Малопичугино (предприятие 1 (Тж) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	38,478	19,816	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,603	0,462	↓
k3	> 0,5	14,708	0,956	0,923	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,551	0,500	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,921	0,847	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,190	0,024	↓
Rb	0,838	100,000	11,753	6,217	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–

Таблица 14. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельного предприятия Чебулинского муниципального округа

Table 14. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Chebula enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
ООО «Чебулинское», пгт. Верх-Чебула (предприятие 1 (Ч) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	1,171	0,946	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,385	0,228	↓
k3	> 0,5	14,708	0,104	0,473	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,454	0,254	↓
k5	≥ 0,1	11,764	–0,967	–1,069	↓
k6	≥ 0,069	11,764	–0,026	–0,014	↑
Rb	0,838	100,000	0,480	0,298	↓
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–

мобильность активов, падающая в динамике (k4 = 0,454 и 0,254); растущая отрицательная величина собственного оборотного капитала (k5 = –0,967 и –1,069); убыточная деятельность предприятия (k6 = –0,026 и –0,014). В итоге влияния негативных факторов рейтинговое число не достигло порогового уровня, и, более того, снизилось в динамике: Rb = 0,480 в 2022 г. и 0,298 в 2023 г. На основе приведенных значений можно сделать вывод о ревальвации высокого уровня риска финансового дефолта рассмотренной организации.

Финансовое здоровье предприятия 1 (Ю) с зерномолочной специализацией (табл. 15) отягощено множеством финансовых проблем: ненормативное значение коэффициента текущей ликвидности в 2023 г. (k1 = 1,618); снижение деловой активности компании на рынке в 2023 г. (k2 = 0,461); ненормативный уровень мобильности активов баланса (k4 = 0,356 в 2022 г. и 0,372 в 2023 г.); отрицательная величина собственного оборотного капитала (k5 = –0,311 и –0,293), не позволяющая финансировать оборотные фонды за счет собственных источников; недостаточный и снижающийся в динамике уровень рентабельности активов предприятия (k6 = 0,053 и 0,009). Результатом наличия серьезных проблемных мест в деятельности предприятия становится отнесение данного субъекта региональной экономики к группе носителей повышенного уровня риска банкротства на фоне ревальвации рисковой ситуации: Rb = 0,805 в 2022 г. и 0,653 в 2023 г.

Аналогичная проблемная финансовая ситуация наблюдалась у предприятия 2 (Ю): снижение ненормативного значения коэффициента текущей ликвидности (k1 = 1,914 в 2022 г. и 1,252 в 2023 г.); низкая степень деловой активности предприятия на рынке (k2 = 0,302 и 0,435); снижение уровня достаточности собственного капитала в 2023 г. (k3 = 0,475); сокращение показателя мобильности активов баланса в 2023 г. (k4 = 0,390); отрицательное значение собственного оборотного капитала в 2023 г. (k5 = –0,343); высокий уровень рентабельности активов в 2022 г. (k6 = 0,406) и почти 20-кратное его падение в 2023 г. (k6 = 0,023). В течение 2022–2023 гг. произошла трансформация низкого уровня риска банкротства (Rb = 0,848) в повышенную вероятность финансового дефолта (Rb = 0,532). Нормативное значение рейтингового числа в 2022 г., предположительно, объясняется высоким уровнем прибыльности активов.

Все представленные в таблице 16 предприятия Яйского района имеют зерно-молочную специализацию. Предприятие 1 (Я) являлось носителем низкого уровня риска банкротства, причем рисковая ситуация относительно стабильна во времени: Rb = 4,618 в 2022 г. и 4,503 в 2023 г. Большинство параметров характеризовались сверхнормативными значениями, особенно выделялся коэффициент текущей ликвидности (k1 = 14,340 в 2022 г. и 13,976 в 2023 г.). Лишь два показателя не соответствовали заданной норме: коэффициент деловой активности (k2 = 0,469 и 0,417), отражающий соотношение выручки и стоимости имущества предприятия, и показатель рентабельности (убыточности) активов (k6 = –0,037 и –0,030), демонстрирующий убыточную деятельность компании. С определенной долей условности можно утверждать, что

Таблица 15. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельных предприятий Юргинского муниципального округа

Table 15. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Yurga enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
ООО «Юргинский Аграрий», с. Проскоково (предприятие 1 (Ю) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	2,108	1,618	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,493	0,461	↓
k3	> 0,5	14,708	0,532	0,517	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,356	0,372	↑
k5	≥ 0,1	11,764	–0,311	–0,293	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,053	0,009	↓
Rb	0,838	100,000	0,805	0,653	↓
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–
ООО «Юргинский», пос. Юргинский (предприятие 2 (Ю) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	1,914	1,252	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,302	0,435	↑
k3	> 0,5	14,708	0,533	0,475	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,583	0,390	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,199	–0,343	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,406	0,023	↓
Rb	0,838	100,000	0,848	0,532	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	более 50 %	–

Таблица 16. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельных предприятий Яйского муниципального округа

Table 16. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Yaya enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
ПСХК «Первомайский», с. Кайла (предприятие 1 (Я) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	14,340	13,976	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,469	0,417	↓
k3	> 0,5	14,708	0,939	0,943	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,555	0,548	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,890	0,896	↑
k6	≥ 0,069	11,764	–0,037	–0,030	↑
Rb	0,838	100,000	4,618	4,503	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–
ООО «Успех Агро», пос. Новостройка (предприятие 2 (Я) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	123,052	20,392	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,664	0,704	↑
k3	> 0,5	14,708	0,692	0,877	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,545	0,503	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,437	0,757	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,370	0,130	↓
Rb	0,838	100,000	36,581	6,426	–
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–
ООО «Агропромхлеб», с. Ишим (предприятие 3(Я) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	0,553	0,455	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,324	0,348	↑
k3	> 0,5	14,708	0,181	0,328	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,420	0,152	↓
k5	≥ 0,1	11,764	–0,805	–3,461	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,052	0,149	↑
Rb	0,838	100,000	0,179	–0,126	↓
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–

высокое рейтинговое число сформировалось в основном за счет семикратно превышающего нормативное значение коэффициента текущей ликвидности (k1).

Финансовое здоровье предприятия 2 (Я) выделялось на фоне аналитической информации других хозяйствующих субъектов. Особенно отмечались уровень коэффициента текущей ликвидности (k1 = 123,052) и величина рейтингового числа (Rb = 36,581) в 2022 г. Деятельность предприятия описывали наилучшими характеристиками: высочайший уровень текущей ликвидности; значительная деловая активность на рынке (k2 = 0,664 в 2022 г. и 0,704 в 2023 г.); экспансия собственного капитала, выражающаяся в растущем сверхнормативном уровне достаточности собственных источников финансирования (k3 = 0,692 и 0,877); относительно стабильный нормативный уровень мобильности активов (k4 = 0,545 и 0,503); возможность финансирования оборотных фондов за счет собственных источников на 43,7 % в 2022 г. и на 75,7 % в 2023 г.; высокий уровень рентабельности активов (k6 = 0,370 и 0,130). Таким образом, предприятие являлось носителем минимального уровня риска финансового дефолта: Rb = 36,581 в 2022 г. и 6,426 в 2023 г.

Предприятие 3 (Я) испытывало высокий риск банкротства и имело негативные показатели по многим аналитическим направлениям: недопустимый уровень текущей ликвидности (k1 = 0,553 в 2022 г. и 0,455 в 2023 г.), деловой активности (k2 = 0,324 и 0,348 соответственно), финансовой независимости (k3 = 0,181 и 0,328), мобильности активов (k4 = 0,420 и 0,152); кратно растущая отрицательная величина собственного оборотного капитала (k5 = –0,805 и –3,461). Предприятие работало прибыльно, уровень чистой прибыли рос в динамике (k6 = 0,052 и 0,149). Однако данный фактор не смог оказать значительного влияния на рейтинговое число: Rb = 0,179 в 2022 г. и –0,126 в 2023 г. В данном случае очевидна ревальвация высокого уровня риска финансового дефолта.

Предприятие 1 (Яш) с зерно-молочной специализацией (табл. 17), несмотря на значительное количество финансовых проблем, относилось к носителям низкого уровня риска банкротства: Rb = 4,610 в 2022 г. и 4,179 в 2023 г. Предкризисные атрибуты наблюдались в следующих аналитических секторах: низкая деловая активность на рынке (k2 = 0,287 в 2022 г. и 0,321 в 2023 г.); недопустимая величина концентрации

Таблица 17. Тестирование модели экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) на материалах отдельных предприятий Яшкинского муниципального округа

Table 17. Express diagnostics of bankruptcy (default) risks for Yashkino enterprises: Model testing

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	Долевое участие индикатора в структуре рейтинга, %	2022 г.	2023 г.	Тренд
ООО «Литвиновское», п/ст. Литвиново (предприятие 1 (Яш) – зерно-молочная специализация)					
k1	≥ 2,0	29,410	15,320	13,950	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,287	0,321	↑
k3	> 0,5	14,708	0,108	0,072	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,608	0,579	↓
k5	≥ 0,1	11,764	–0,464	–0,599	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,043	–0,042	↓
Rb	0,838	100,000	4,610	4,179	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	–
ООО «Яшкинская Птицефабрика», пос. Яшкинский (предприятие 2 (Яш) – птицеводство)					
k1	≥ 2,0	29,410	0,267	0,392	↑
k2	≥ 0,484	17,646	1,236	1,615	↑
k3	> 0,5	14,708	0,067	0,604	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,248	0,153	↓
k5	≥ 0,1	11,764	–2,758	–1,695	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,021	0,539	↑
Rb	0,838	100,000	0,019	0,373	↑
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	–

собственного капитала (k3 = 0,108 и 0,072); в структуре источников финансирования деятельности организации доминировали долгосрочные обязательства; отрицательная величина собственного оборотного капитала, растущая в динамике (k5 = –0,464 и –0,599); недостаточный уровень прибыльности активов в 2022 г. (k6 = 0,043) и убыточная деятельность в 2023 г. (k6 = –0,042). Все финансовые проблемы нивелировались огромной величиной коэффициента текущей ликвидности (k1 = 15,320 в 2022 г. и 13,950 в 2023 г.), которая вызвана отсутствием у предприятия краткосрочных кредитов и наличием мизерных сумм кредиторской задолженности. Кроме того, данный коэффициент имеет максимальный удельный вес в структуре модели, что позволяло ему значительно влиять на результат.

Птицеводческое предприятие 2 (Яш) являлось носителем максимального уровня риска финансового дефолта, который, впрочем, заметно снижался во времени: Rb = 0,019 в 2022 г. и 0,373 в 2023 г. Финансовые показатели данного субъекта региональной экономики имели необычные размеры и динамику: коэффициент текущей ликвидности многократно ниже нормального значения, хоть и имел стремление к росту (k1 = 0,267 в 2022 г. и 0,392 в 2023 г.); показатель деловой активности выше нормального значения в 3–4 раза (k2 = 1,236 и 1,615); коэффициент финансовой независимости в 2022 г. имел абсолютно недопустимое значение (k3 = 0,067), но в 2023 г. десятикратно возрос (k3 = 0,604) за счет экспансии нераспределенной прибыли; коэффициент мобильности активов очень низок и траектория его движения устремлена вниз (k4 = 0,248 и 0,153), что обусловлено расширением и без того высокой стоимости внеоборотных активов предприятия; собственный оборотный капитал характеризовался отрицательной величиной, которая снижалась по модулю (k5 = –2,758 и –1,695), что можно объяснить превышением темпов роста нераспределенной прибыли по сравнению с расширением внеоборотных активов; уровень рентабельности активов в 2022 г. более чем в 3 раза ниже регионального значения-ориентира (k6 = 0,021), но в 2023 г. многократно возросла чистая прибыль, что отразилось на колоссальном росте показателя (k6 = 0,539). Но даже масштабный рост некоторых экспонентов модели не смог оказать значительного воздействия на рейтинговое число в условиях выявленных проблем.

Итак, практическое применение модели в качестве эластичного методического инструмента экспресс-диагностики риска банкротства (дефолта) обеспечивает высокую скорость сигнального анализа и повышает прогностическое качество оценочной процедуры в регионально-отраслевом сегменте экономики.

Подытоживая вышеизложенную аналитическую информацию, дифференцируем ее в зависимости от уровня риска банкротства в деятельности предприятий. В первую очередь представим перечень изученных хозяйствующих субъектов – носителей минимального уровня риска финансового дефолта (табл. 18).

По результатам аналитической работы можно заключить: 18 организаций (в том числе, в разрезе сегментов регионально-отраслевой экономики: смешанное сельское хозяйство – 13; птицеводство – 3; рыбоводство – 1;

Таблица 18. Выборка анализируемых сельскохозяйственных предприятий Кемеровской области – Кузбасса с низким уровнем риска финансового дефолта

Table 18. Agricultural enterprises with low bankruptcy risks

Предприятие	Уровень риска банкротства в 2022 и 2023 г. (рейтинговое число в динамике)
Смешанное сельское хозяйство	
ООО «СХК Сидоровское», с. Сидорово (предприятие 3 (Н) – молочная специализация)	менее 50 % (Rb = 7,146; 5,594)
ООО «СХП Михайловское», с. Михайловское (предприятие 1 (Пр) – зерно-молочная специализация)	менее 50 % (Rb = 0,870; 1,078)
ООО «Цветущий», д. Протопопово (предприятие 3 (П) – зерно-молочная специализация)	трансформация повышенного риска банкротства в 2022 г. в низкий уровень рисковой ситуации в 2023 г. (Rb = 0,727; 0,959)
ООО «Лебеди», с. Лебеди (предприятие 6 (П) – зерно-молочная специализация)	трансформация повышенного риска банкротства в 2022 г. в низкий уровень рисковой ситуации в 2023 г. (Rb = 0,604; 1,605)
СПК «Береговой», д. Береговая (предприятие 1 (К) – выращивание овощей, зерно-молочная специализация)	менее 50 % (Rb = 1,242; 1,388)
ООО «Зерноград», с. Зарубино (предприятие 1 (Т) – зерно-молочная специализация)	менее 50 % (Rb = 2,265; 5,339)
СХА (колхоз) «Заря», с. Шабаново (предприятие 2 (Л-К) – зерно-молочная специализация)	менее 50 % (Rb = 1,976; 1,348)
ООО «ПЗ Ленинск-Кузнецкий», с. Подгорное (предприятие 3 (Л-К) – зерно-молочная специализация)	менее 50 % (Rb = 2,804; 1,980)
СПК «Северный», с. Колыон (предприятие 2 (И) – зерно-молочная специализация)	трансформация повышенного риска банкротства в 2022 г. в низкий уровень рисковой ситуации в 2023 г. (Rb = 0,783; 1,175)
СПК «Пичугинский», с. Малопичугино (предприятие 1 (Тж) – зерно-молочная специализация)	менее 50 % (Rb = 11,753; 6,217)
ПСХК «Первомайский», с. Кайла (предприятие 1 (Я) – зерно-молочная специализация)	менее 50 % (Rb = 4,618; 4,503)
ООО «Успех Агро», пос. Новостройка (предприятие 2 (Я) – зерно-молочная специализация)	менее 50 % (Rb = 36,581; 6,426)
ООО «Литвиновское», п/ст. Литвиново (предприятие 1 (Яш) – зерно-молочная специализация)	менее 50 % (Rb = 4,610; 4,179)
Птицеводство	
ООО «Кузбасский Бройлер», пос. Металлургов (предприятие 2 (Н) – мясное птицеводство)	менее 50 % (Rb = 1,344; 1,231)
АО «Кузбасская Птицефабрика», пос. Степной (предприятие 5 (Н) – яичная и мясная специализация)	менее 50 % (Rb = 3,889; 1,223)
ООО «Кемеровская инкубационно-птицеводческая станция», пос. Ясногорский (предприятие 2 (К) – птицеводство)	менее 50 % (Rb = 1,432; 1,498)
Рыбоводство	
ООО «Беловское рыбное хозяйство», пгт. Инской (предприятие 2 (Б) – рыбоводство)	менее 50 % (Rb = 29,458; 12,060)
Искусственное осеменение сельскохозяйственных животных	
АО «Кемеровоплем», пос. Ясногорский (предприятие 5 (К) – искусственное осеменение с/х животных)	менее 50 % (Rb = 7,935; 5,668)

искусственное осеменение сельскохозяйственных животных – 1 из 38 обладали текущей и перспективной способностью противостоять вызовам рынка, даже при наличии отдельных финансовых проблем.

Наибольший интерес для исследования представляла группа товаропроизводителей, выступающих носителями высокого уровня риска банкротства. Синтезировав индивидуальные аналитические материалы по выборочным предприятиям с использованием метода индукции, попытались определить области финансового воздействия по укреплению финансового здоровья сельхозпроизводителей региона (табл. 19–21).

В сегменте смешанного сельского хозяйства региона из выборки предприятий выявлено 17 с высоким уровнем риска финансового дефолта и с индивидуальными ключевыми ориентирами финансового оздоровления.

Таблица 19. Ключевые ориентиры финансового оздоровления в сегменте смешанного сельского хозяйства Кемеровской области – Кузбасса

Table 19. Key benchmarks for financial recovery in agriculture

Предприятие с высоким уровнем риска банкротства	Уровень риска банкротства / кризисные поля в деятельности	Ключевые ориентиры финансового оздоровления
ООО «Сосновское», с. Сосновка (предприятие 4 (Н) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = 0,670 в 2022 г. и 0,714 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; убыточная деятельность в 2022 г. и недостаточный уровень рентабельности активов в 2023 г.	факторы роста ликвидности баланса и чистой прибыли
«КФХ Балбин И. Н.», с. Тарасово (ранее – ООО «Тара») (предприятие 1 (П) – зерно-молочная специализация)	менее 50 % в 2022 г. (Rb = 6,793) и более 50 % в 2023 г. (Rb = 0,566) / ненормативная ликвидность баланса; низкая деловая активность; недостаточность собственного капитала; убыточность активов	факторы роста ликвидности баланса, выручки, собственного капитала и чистой прибыли
АО «Ваганово», с. Ваганово (предприятие 2 (П) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = 0,212 в 2022 г. и 0,355 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; низкая деловая активность; недостаточность собственного капитала; низкая мобильность активов; отрицательная величина собственного оборотного капитала; падающий ненормативный уровень рентабельности активов	факторы роста ликвидности баланса, выручки, собственного капитала, чистой прибыли
ООО «МТФ Родная земля», с. Окунево (предприятие 4 (П) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = 0,601 в 2022 г., Rb = 0,513 в 2023 г.) / низкая деловая активность; недостаточность собственного капитала; низкая мобильность активов; отрицательная величина собственного оборотного капитала; низкая рентабельность активов в 2022 г. и убыточная деятельность в 2023 г.	факторы роста выручки, собственного капитала и чистой прибыли
АО «Ударник полей», пгт. Промышленная (предприятие 5 (П) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = 0,743 в 2022 г. и 0,198 в 2023 г.) / низкая деловая активность; низкая мобильность активов; отрицательная величина собственного оборотного капитала; убыточная деятельность	факторы роста выручки и чистой прибыли
ООО «Темп», пгт. Промышленная (предприятие 7 (П) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = 0,728 в 2022 г. и 0,770 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; недостаточность собственного капитала; отрицательная величина собственного оборотного капитала; ненормативная рентабельность активов	факторы роста ликвидности баланса, собственного капитала и чистой прибыли
ООО «СХО Заречье», пос. Новостройка (предприятие 3 (К) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = –1,397 в 2022 г. и –4,263 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; низкая деловая активность; огромные массивы нераспределенных убытков текущего года и прошлых лет; отрицательная величина собственного оборотного капитала; катастрофический уровень убытков	факторы роста ликвидности баланса, выручки и чистой прибыли
ООО «Селяна», пос. Кузбасский (предприятие 4 (К) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = –0,119 в 2022 г. и –0,332 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; низкая деловая активность; недостаточность собственного капитала; низкая мобильность активов; отрицательная величина собственного оборотного капитала; ненормативная рентабельность активов	факторы роста ликвидности баланса, выручки, собственного капитала и чистой прибыли
ООО «ФХ ИжморВодСтрой», с. Святославка (предприятие 1 (И) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = 0,453 в 2022 г. и 0,160 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; недостаточность собственного капитала; низкая мобильность активов; отрицательная величина собственного оборотного капитала; низкая рентабельность активов в 2022 г.	факторы роста ликвидности баланса, собственного капитала и чистой прибыли
ООО «Барачатское», с. Барачаты (предприятие 1 (Кр) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = 0,818 в 2022 г. и 0,706 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; низкая рентабельность активов в 2022 г. и убыточная деятельность в 2023 г.; негативная динамика показателей деловой активности, достаточности собственного капитала и собственного оборотного капитала	факторы роста ликвидности баланса, выручки, собственного капитала и чистой прибыли

Продолженине таблицы 19

Предприятие с высоким уровнем риска банкротства	Уровень риска банкротства / кризисные поля в деятельности	Ключевые ориентиры финансового оздоровления
ООО «Агрохолдинг Кузбасский», с. Борисово (предприятие 2 (Кр) – молочная-мясная-зерновая специализация)	более 50 % (Rb = 0,812 в 2022 г. и 0,664 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; низкая мобильность активов; отрицательное значение собственного оборотного капитала в 2023 г.	факторы роста ликвидности баланса, выручки и собственного капитала
ООО «Сельхозагро-Сервис», с. Ариничево (предприятие 1 (Л-К) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = 0,532 в 2022 г. и 0,700 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; недостаточность собственного капитала; низкая рентабельность активов	факторы роста ликвидности баланса, собственного капитала и чистой прибыли
ООО «Чебулинское», пгт. Верх-Чебула (предприятие 1 (Ч) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = 0,480 в 2022 г. и 0,298 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; низкая деловая активность; недостаточность собственного капитала; низкая мобильность активов; отрицательная величина собственного оборотного капитала; убыточная деятельность	факторы роста ликвидности баланса, выручки, собственного капитала и чистой прибыли
ООО «Юргинский Аграрий», с. Проскоково (предприятие 1 (Ю) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = 0,805 в 2022 г. и 0,653 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; снижение деловой активности; отрицательная величина собственного оборотного капитала; низкая рентабельность активов	факторы роста ликвидности баланса, выручки, собственного капитала и чистой прибыли
ООО «Юргинский», пос. Юргинский (предприятие 2 (Ю) – зерно-молочная специализация)	трансформация низкого уровня риска банкротства (Rb = 0,848) в повышенную вероятность финансового дефолта (Rb = 0,532) / снижение ликвидности баланса; низкая деловая активность; снижение уровня достаточности собственного капитала в 2023 г.; снижение мобильности активов; отрицательное значение собственного оборотного капитала в 2023 г.; высокий уровень рентабельности активов в 2022 г. (k6 = 0,406) и почти 20-кратное его падение в 2023 г. (k6 = 0,023)	факторы роста ликвидности баланса, выручки, собственного капитала и чистой прибыли
ООО «Агропромхлеб», с. Ишим (предприятие 3 (Я) – зерно-молочная специализация)	более 50 % (Rb = 0,179 в 2022 г. и –0,126 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; низкая деловая активность; недостаточность собственного капитала; снижение мобильности активов; отрицательная величина собственного оборотного капитала	факторы роста ликвидности баланса, выручки и собственного капитала
ООО «Крестьянское Хозяйство», с. Воскресенка (предприятие 3 (И) – зерно-молочная специализация)*	более 50 % (Rb = 0,365 в 2022 г. и 0,396 в 2023 г.) / низкая рентабельность активов в 2022 г. и убыточная деятельность в 2023 г.; низкий уровень деловой активности; отсутствие краткосрочных обязательств (в том числе кредиторской задолженности), а, следовательно, невозможность расчета коэффициента текущей ликвидности (что снижает рейтинговое число)	факторы роста выручки и чистой прибыли

Таблица 20. Ключевые ориентиры финансового оздоровления в птицеводческом сегменте Кемеровской области – Кузбасса

Table 20. Key benchmarks for financial recovery in poultry farming

Предприятие	Уровень риска банкротства / кризисные поля в деятельности	Ключевые ориентиры финансового оздоровления
ООО «ППФ Снежинская», пос. Снежинский (предприятие 1 (Б) – птицеводство)	более 50 % (Rb = –0,056 в 2022 г. и 0,060 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; недостаточность собственных ресурсов; низкая мобильность активов; отрицательная величина собственного оборотного капитала	факторы роста ликвидности баланса и собственного капитала
ООО «Яшкинская Птицефабрика», пос. Яшкинский (предприятие 2 (Яш) – птицеводство)	более 50 % (Rb = 0,019 в 2022 г. и 0,373 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; недостаточность собственного капитала в 2022 г.; низкая мобильность активов; отрицательная величина собственного оборотного капитала; низкая рентабельность активов в 2022 г.;	факторы роста ликвидности баланса, собственного капитала, чистой прибыли

Таблица 21. Ключевые ориентиры финансового оздоровления в свиноводческом сегменте Кемеровской области – Кузбасса

Table 21. Key benchmarks for financial recovery in pork farming

Предприятие	Уровень риска банкротства / кризисные поля в деятельности	Ключевые ориентиры финансового оздоровления
ООО СПК «Чистогорский», пос. Чистогорский (предприятие 1 (Н) – свиноводство)	девальвация повышенного уровня риска банкротства (Rb = –0,793 в 2022 г. и 0,116 в 2023 г.) / ненормативная ликвидность баланса; недостаточность собственного капитала; низкая мобильность активов; отрицательная величина собственного оборотного капитала; убыточная деятельность в 2022 г. и низкий уровень рентабельности активов в 2023 г.	факторы роста ликвидности баланса, собственного капитала, чистой прибыли

Таблица 22. Инструменты «факторного» финансового управления как ключевые ориентиры финансового оздоровления предприятий

Table 22. “Factor-based” financial management tools as key benchmarks for financial recovery

Факторы	Описание факторов, положительно воздействующих на кризисные поля
Факторы роста ликвидности баланса	высокая концентрация собственного капитала; сокращение краткосрочных обязательств; трансформация части краткосрочных обязательств в долгосрочные; расширение высоколиквидных активов (денежных средств и денежных эквивалентов); суммарная и временная синхронность денежных потоков (требований и обязательств); обеспечение возможности быстрой трансформации денежных и материальных активов в денежные средства; оптимальное соотношение дебиторской и кредиторской задолженности (→ 1); оптимизация объема запасов, минимизация незавершенного производства; соблюдение финансового правила: финансирование инвестиционной программы (внеоборотных активов) за счет долгосрочных кредитов, а оборотных активов – за счет краткосрочных заемных и привлеченных средств и т. п. (кризисные поля: ненормативная ликвидность баланса; низкая мобильность активов)
Факторы роста выручки Факторы роста чистой прибыли	рост объема производимой и реализуемой продукции; повышение качества товаров; расширение ассортимента выпускаемой продукции; оптимизация ценовой политики; дифференцированный и гибкий подход к покупателям; повышение производительности труда и эффективности бизнес-процессов; детальный анализ спроса и предложения товаров на рынке с целью обоснования стратегии продаж; обеспечение уникальных предложений, отличного сервиса; разработка новых технологических процедур в стратегии продаж; оптимизация себестоимости (энергосбережение; повышение качества логистики и складского хозяйства; сокращение управленческих и коммерческих расходов; обеспечение положительного сальдо по прочим доходам и расходам, по процентам к получению и уплате; расширение участия в деятельности других организаций с целью роста доходов); превышение темпов роста выручки над ростом валюты баланса и т. п. (кризисные поля: низкий уровень деловой активности; низкая рентабельность активов)
Факторы роста собственного капитала	накопление, консервация нераспределенной прибыли; увеличение уставного капитала; рост чистой прибыли (факторы роста описаны выше); рост доли чистой прибыли, остающейся в распоряжении предприятия; рост эмиссионного дохода; периодическая переоценка внеоборотных активов; присоединение к добавочному капиталу суммы использованных целевых инвестиционных средств; преобладание стоимости собственного капитала над величиной внеоборотных активов и т. п. (кризисные поля: недостаточность собственного капитала; отрицательная величина собственного оборотного капитала)

В птицеводческом сегменте региона из выборочной совокупности предприятий выявлено 2 организации с высоким уровнем риска банкротства (табл. 20).

Единственное предприятие в свиноводческом сегменте региона из выборочной совокупности предприятий является носителем высокого уровня риска банкротства (табл. 21).

Так, ключевые ориентиры финансового оздоровления предприятий могут быть описаны факторами, понижающими уровень риска банкротства. Эти факторы выступают специфическими инструментами «факторного» управления в сфере риск-менеджмента (табл. 22). Смысловая нагрузка термина «факторное» управление рисковой ситуацией отражает выявление факторов, повышающих и понижающих уровень риска, а также конструирование управленческой стратегии на этой основе, что позволяет предвидеть и решать возникающие проблемы до того, как они перерастут в финансовый кризис [21].

В качестве ключевых ориентиров финансового оздоровления изученных предприятий выступают: факторы роста ликвидности баланса, выручки, чистой прибыли и собственного капитала. Однако несложно заметить тесную связь указанных факторов с факторами роста собственного капитала.

Во-первых, основным фактором роста ликвидности является крепкая капитальная база (высокая концентрация собственного капитала), экспансия которой позволяет сократить массивы обязательств организации, в том числе краткосрочных, и повысить уровень ликвидности баланса организации.

Во-вторых, факторы роста выручки и чистой прибыли могут рассматриваться как необходимые условия формирования стержневых источников собственной ресурсной базы. Выручка (вновь созданная стоимость), выступает базой формирования чистой прибыли и, впоследствии, аккумулирования нераспределенной прибыли в составе собственного капитала. Чистая прибыль как конечный финансовый результат деятельности производителя и его финансовый ресурс предназначена для накопления собственных средств и их потребления в заданных направлениях.

Выводы

Финансовое оздоровление товаропроизводителей связано с восстановлением их платежеспособности и предотвращением процесса ликвидации предприятий в кризисных обстоятельствах. Досудебное финансовое оздоровление должно иметь статус стратегии предприятий, направленной на восстановление нормативного уровня платежеспособности субъекта. Выживаемость на рынке потребует значительных затрат по глубокому анализу внешней и внутренней среды, освоению новых технологических процедур, перепрофилированию производства, ликвидации нерентабельных бизнес-процессов, формированию антикризисной команды из высококвалифицированных работников и т. п.

В качестве базы ключевых ориентиров финансового оздоровления товаропроизводителей в деятельности предприятий, которые подверглись предварительной оценке с позиции масштабов предкризисного состояния субъектов региональной экономики, выявили кризисные поля. Ключевые ориентиры финансового оздоровления как финансовые рычаги антикризисного управления идентифицировались с использованием системы операционных инструментов и генеральных метрик риска банкротства. В аналитической практике довольно часто возникают определенные сложности в использовании современных методик, алгоритмов, оценочных механизмов и прогностических моделей. Проблематика обусловлена различными подходами к определению нормальных (нормативных, критических, пороговых) значений системы метрик, и обычно экспоненты моделей не имеют отраслевой ориентации. Данная модель не является исключением: нормативные уровни большинства показателей (k1, k3, k4, k5) ориентированы на традиционные (единые, канонизированные) значения без учета отраслевой спецификации (табл. 3). В этой связи необходимо подчеркнуть возможность искажения оценочных характеристик результатов анализа. Но отдельные экспоненты модели (k2, k6) имеют регионально-отраслевые значения-ориентиры (усредненные величины, рассчитанные на основе статистических данных за период 2019–2023 гг.) для оценки их фактического уровня, что смягчает обозначенную погрешность.

В качестве фундаментального ориентира финансового оздоровления производителей определены факторы роста собственного капитала и источников (элементов) его формирования. Такой результат исследовательской работы представляется логичным и обоснованным. Высокая концентрация собственного капитала (более 50 %) в структуре ресурсов предприятия приводит к его финансовой автономии на рынке (снижая зависимость от кредиторов); позволяет принимать самостоятельные и гибкие управленческие решения; определяет уровень финансовой устойчивости и платежеспособности предприятия; снижает уровень чувствительности к финансовым рискам. В таких условиях повышается инвестиционная привлекательность предприятия, и оно позиционирует себя в деловом мире как стабильный партнер.

В деятельности многих предприятий, изученных в рамках аналитической части работы, отмечена проблема недостаточности собственного капитала, а, следовательно, это не частный случай, а серьезная финансовая проблема, имеющая массовый характер. С этой позиции современная государственная денежно-кредитная политика, направленная на рестрикцию (политику дорогих денег и дорогих кредитов), при своем спорном характере в конкретных исторических условиях тем не менее имеет некоторое объяснение: она стимулирует экспансию собственных средств хозяйствующих субъектов.

Критерии авторства

Сбор, обработка, анализ и обобщение материалов исследований – С. Г. Черниченко (50 %); консультирование, определение основных этапов работы, общие выводы по результатам исследования – Р. М. Котов (50 %).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

S.G. Chernichenko was responsible for data collection, processing, analysis, and generalization (50%); R.M. Kotov (50%) provided scientific consultation, designed the research, and formulated the conclusions.

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. Черниченко С. Г., Котов Р. М. Методический инструментарий диагностики несостоятельности (банкротства) организаций в системе антикризисного управления. Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 4. С. 588–601. [Chernichenko SG, Kotov RM. Methodological tools for diagnosing insolvency (bankruptcy) of organizations in the anti-crisis management system. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(4):588–601. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-588-601

2. Черниченко С. Г., Котов Р. М. Синтезированные методические технологии в области диагностики несостоятельности (банкротства) организаций в системе антикризисного управления (на материалах сельскохозяйственных организаций Кемеровской области – Кузбасса). Кемерово: Кемеровский государственный университет; 2023. 118 с. [Chernichenko SG, Kotov RM. Synthesized methodological technologies in the field of insolvency (bankruptcy) diagnostics of organizations in the anti-crisis management system (based on materials from agricultural organizations in the Kemerovo region - Kuzbass). Kemerovo: Kemerovo State University; 2023. 118 p. (In Russ.)]

3. Черниченко С. Г., Котов Р. М. Экспресс-диагностика риска банкротства организаций на базе селективно-индикативной модели, с регионально-отраслевой спецификацией. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 167–177. [Chernichenko SG, Kotov RM. Express diagnostics of bankruptcy risks based on a selective-indicative model. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):167–177. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2498

4. Крюков А. Ф., Егорычев И. Г. Анализ методик прогнозирования кризисной ситуации коммерческих организаций с использованием финансовых индикаторов. Менеджмент в России и за рубежом. 2001. № 2. С. 18–31. [Kryukov AF, Egorychev IG. Crisis forecasting methods for commercial organizations: Financial indicators. Management in Russia and Abroad. 2001;(2):18–31. (In Russ.)]

5. Абдуллаева П. Р., Бандурина Н. В., Воронина Ю. М. Законодательство о банкротстве: преемственность и новации. М.: Юстицинформ; 2023. 348 с. [Abdullayeva PR, Bandurina NV, Voronina YuM. Bankruptcy legislation: Continuity and innovation. Moscow: Yustitsinform; 2023. 348 p. (In Russ.)]

6. Бариленко В. И. Комплексный анализ хозяйственной деятельности. М.: Юрайт; 2023. 455 с. [Barilenko VI. Комплексный анализ хозяйственной деятельности. Moscow: Yurayt; 2023. 455 p.]

7. Жданов В. Ю. Диагностика риска банкротства. М.: Проспект; 2022. 159 с. [Zhdanov VYu. Bankruptcy risk diagnostics. Moscow: Prospekt; 2022. 159 p. (In Russ.)]

8. Ряховская А. Н. Банкротство и финансовое оздоровление субъектов экономики. М.: Юрайт; 2023. 153 с. [Ryakhovskaya AN. Bankruptcy and financial recovery of economic entities. Moscow: Yurayt; 2023. 153 p. (In Russ.)]

9. Андрианов А. О., Козлова Е. Е., Бубнова О. Ю., Соловьёв О. Д. Анализ направлений и моделей оценки устойчивого роста компаний и корпораций. Финансовая экономика. 2019. № 1. С. 287–289. [Andrianov AO, Kozlova EE, Bubnova OYu, Solovyev OD. Sustainable growth of companies and corporations: Trends and assessment. The Financial Economy. 2019;(1):287–289. (In Russ.)] https://elibrary.ru/YVZPRB

10. Донцова Л. В., Никифорова Н. А. Риски: аналитический аспект. Вестник Брянского государственного университета. 2014. № 3. С. 263–269. [Nikiforova NA, Dontsova LV. Risks: The analytical aspect. The Bryansk State University Herald. 2014;(3):263–269. (In Russ.)] https://elibrary.ru/TMESHJ

11. Никифорова Н. А., Донцова Л. В., Донцов Е. В. Интеллектуальный анализ данных в моделировании финансового состояния предприятий. Академия бюджета и казначейства минфина России. Финансовый журнал. 2021. № 2. С. 5–18. [Nikiforova NA, Dontsova LV, Dontsov YeV. Intellectual data analysis methods used for building companies' financial performance models. Budget and treasury academy of the ministry of finance of the Russian federation. Journal of Finance. 2021;(2):5–18. (In Russ.)] https://elibrary.ru/NEKRTV

12. Казаков А. В., Колышкин А. В. Разработка моделей прогнозирования банкротства в современных российских условиях. Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2018. Т. 34. № 2. С. 241–266. [Kazakov AV, Kolyshkin AV. The development of bankruptcy prediction models in modern Russian economy. St Petersburg University Journal of Economic Studies. 2018;34(2):241–266. (In Russ.)] https://doi.org/10.21638/11701/spbu05.2018.203

13. Федорова Е. А., Мусиенко С. О., Федоров Ф. Ю. Анализ влияния внешних факторов на прогнозирование финансовой несостоятельности российских компаний. Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2020. Т. 36. № 1. С. 117–133. [Fedorova EA, Musienko SO, Fedorov FYu. Analysis of the external factors influence on the forecasting of bankruptcy of russian companies. St Petersburg University Journal of Economic Studies. 2020;36(1):117–133. (In Russ.)] https://doi.org/10.21638/spbu05.2020.106

14. Шадрина Г. В. Управленческий и финансовый анализ. М.: Юрайт; 2023. 316 с. [Shadrina GV. Management and financial analysis. Moscow: Yurayt; 2023. 316 p. (In Russ.)]

15. Горбатков С. А., Фархиева С. А., Белолипцев И. И. Нейросетевые и нечеткие методы моделирования диагностики и прогнозирования банкротств корпораций. М.: Прометей; 2018. 371 с. [Gorbatkov SA, Farkhiyeva SA, Beloliptsev II. Neural network and fuzzy modeling methods for diagnosing and forecasting corporate bankruptcy. Moscow: Prometey; 2018. 371 p.]

16. Мизанбекова С. К., Богомолова И. П., Шатохина Н. М. Перспективы использования цифровых и инновационных технологий в управлении конкурентоспособностью предприятий. Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 2. С. 372–382. [Mizanbekova SK, Bogomolova IP, Shatohina NM. Prospects for digital and innovative technologies in management competitiveness of enterprises. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(2):372–382. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-372-382

17. Хамская С. Г. Оценка кредитного риска в рамках коммерческого кредитования: в форме прямых заимствований между предприятиями: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.10. Новосибирск, 2006. 193 с. [Khamskaya SG. Credit risk assessment in commercial lending: Direct borrowings between enterprises: Diss. Cand. Sci. Eng.: 08.00.10. Novosibirsk, 2006. 193 p. (In Russ.)]

18. Altman E, Hotchkiss E. Corporate financial distress and bankruptcy: Predict and avoid bankruptcy, analyze and invest in distressed debt. NY: John Wiley & Sons; 2021. 307 p.

19. Kücher A, Mayr S, Mitter C, Duller C, Feldbauer-Durstmüller B. Firm age dynamics and causes of corporate bankruptcy: Age dependent explanations for business failure. Review of Managerial Science. 2018;14;633–661. https://doi.org/10.1007/s11846-018-0303-2

20. Newton GW. Bankruptcy and insolvency accounting: Practice and procedure. NY: John Wiley & Sons; 2009. 554 p.

21. Черниченко С. Г., Гильмулина С. А., Дудинская Т. К., Щеглова М. А. Основные компоненты стратегии «факторного» управления совокупным кредитным риском как альтернативного приема риск-менеджмента. Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 2. № 10. С. 57–63. [Chernichenko SG, Gilmulina SA, Dudinskaya TK, Shcheglova MA. Main components of the strategy «factor» management aggregate credit exposure as an alternative risk management reception. Advances in modern science and education. 2016;2(10):57–63. (In Russ.)] https://elibrary.ru/XCGVED

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Черниченко Светлана Геннадьевна / Svetlana G. Chernichenko ORCID 0000-0002-0172-3783; eLIBRARY SPIN 1934-3157
Котов Роман Михайлович / Roman M. Kotov ORCID 0000-0003-0238-3466; eLIBRARY SPIN 3447-3926

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://fptt.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, лишних пробелов 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://fptt.ru, или отправив на e-mail fptt98@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://fptt.ru

FOR AUTHORS

Food Processing: Techniques and Technology reports pioneering research in the food industry and all branches of agricultural science. We publish scientific papers, reviews, and brief scientific reports in such spheres of food science as food systems, biotechnology, food production technology, sanitation and hygiene, ecology, biosafety, zootechnics, agro-industrial machinery, etc.

Before submitting your manuscript, please make sure you have not submitted it elsewhere. Your research topic should correspond to the profile of the Journal and be relevant for the scientific community.

First, we check if your manuscript complies with the Journal's profile and formatting. Then, we check it for unattributed borrowings from open sources (plagiarism) at *antiplagiat.ru*.

After that, your manuscript undergoes a double-blind peer review by specialists appointed by the Editor-in-Chief or the Deputy Editor-in-Chief. The peer review can be conducted by the members of the Editorial Board or by acknowledged academic experts in the area of research who have recent publications on the related topic. To be published, a manuscript has to be recommended by two independent reviewers.

The Reviewers are notified about the manuscripts being the authors' private owner rights that cannot be subject to public disclosure. The Reviewers are not allowed to copy them. Reviewing is strictly confidential. Violation of confidentiality is impossible unless the Reviewer reports unreliability or counterfeiting.

Usually, reviewing does not exceed three months from the day the Reviewer receives the manuscript.

All reviews are disposed of five years after the publication.

Based on the results, the Reviewer produces a reasoned opinion: the manuscript can be recommended for publication; the manuscript can be recommended for publication after some improvement; the manuscript cannot be recommended for publication (reasons for rejection).

If the article underwent a considerable follow-on revision, it is again sent to the same Reviewer who gave the critical remarks.

We reserve the right to reject the manuscript if the Author is unable or unwilling to follow the recommendations.

In case of two negative initial reviews or one negative review on the revised variant, the manuscript is rejected without considering by other members of the Editorial Board.

The Author of the rejected article receives the reviews and a motivated refusal. The Reviewer's name may be reported to the Author provided that the former gives consent to it.

After reviewing, the Editor-in-Chief and the Editorial Board make the final decision.

All accepted articles require a publishing charge of 100,000 rubles per article, regardless of volume, language, graphic material, etc. Submission and peer review are free of charge, which means that you pay the article publishing charge only after you have received a positive review and your manuscript have been accepted for publication by the Editor-in-Chief. More information is available at *fptt.ru/en*

We are obliged to provide review copies to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation upon request, but we do not retain rejected articles.Accepted manuscripts are not returned. The manuscripts with negative reviews are not published and not returned to the Author, either.

Manuscripts are usually published in the order we receive them. In exceptional cases, the Editorial Board maintains the right to change the order of publication.

All papers published in the *Food Processing: Techniques and Technology* fall under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

FORMATTING

The article body should be 30,000–35,000 characters with spaces (abstract, figures, and tables included). Reviews have an unlimited wordage.

Format instructions:

– 20 mm margins;
– single line spacing without automatic hyphenation;
– no extra interspaces between words or gaps between paragraphs;
– Times New Roman, size 10;
– editable and colored Microsoft Office or Corel Draw figures and diagrams attached separately as tiff, jpeg, cdr, or excel files.

Please, do not overload your text with unnecessary formulae; do not illustrate the same results with both a table and a graph. Give each table or figure a header and a number, which you will use in the text to introduce them.

Structure:

1. Type of manuscript (research paper/review/report);
2. Title;
3. Initials and last names of the authors;
4. Affiliations;
5. Email of the author responsible for correspondence;
6. Abstract (Introduction; Study objects and methods; Results and discussion; Conclusions);
7. Keywords;
8. Funding;
9. Article body (Introduction; Study objects and methods; Results and discussion; Conclusions);
10. Contribution;
11. Conflict of Interest;
12. Acknowledgements;
13. References;
14. About the authors.

You can submit your manuscript and all accompanying documents on our site *fptt.ru/en* or email them to *fptt98@gmail.com*

Documents:

1. An MSWord e-version of your article named by the first author's last name (e.g., Smith.doc.);

2. A scanned PDF version of your article, the first page signed by all the authors (Smith.pdf.);

3. A scanned PDF version of a cover letter to the Chief Editor from your organization with the conclusion about the relevance of the research and recommendations for its publishing. It should contain the date, reference number, and the signature of the head of the organization;

4. A standard copyright agreement;

5. A consent to the Processing of Personal Data;

6. A consent to the Distribution of Personal Data;

7. A consent to the Cross-Border Transfer of Personal Data.

For more information, please, visit us at *fptt.ru/en*

ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)
https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4
https://fptt.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Косовский Г. Ю., Глазко Т. Т. Диспергированные и тандемные повторы в геномах и генах некоторых видов млекопитающих 687

Бородина Е. Е., Гордиенко А. В., Плешивцев И. И., Фотина Н. В., Федорова А. М., Мартиросян В. В. Биологический потенциал бактериального штамма рода *Pantoea* в защите от биотического стресса и стимуляции роста зерновых культур 710

Лисицын А. Б., Чернуха И. М., Никитина М. А., Пчелкина В. А. Применение хемометрики в аналитике пищевых систем 723

Симоненко Е. С., Симоненко С. В., Залетова Т. С., Хитров А. А., Семенова Е. С., Бегунова А. В., Самсонова И. С. Инновационные подходы к созданию специализированных продуктов на основе растительного сырья как ключ к профилактике кардиоваскулярных рисков 745

Оганесянц Л. А., Панасюк А. Л., Свиридов Д. А., Ганин М. Ю. Установление критериев подлинности меда с использованием методов изотопной масс-спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой 755

Попова Е. А. Влияние засоления на состав вторичных метаболитов и антиоксидантную активность экстрактов каллусных культур *Hyssopus officinalis* L. 767

Степанов В. В., Сергеев А. А., Вечтомова Е. А., Зарубин Б. Е., Перевозчикова М. А., Заушинцена А. В. Мясная продуктивность обыкновенной рыси (*Lynx lynx* Linnaeus, 1758) и пищевое качество получаемого мяса 778

Барковская И. А., Ярышев В. Ю., Блиадзе В. Г., Туровская С. Н., Илларионова Е. Е., Кондратенко В. В., Галстян А. Г. Математическая оценка изменения углеводного и белкового профилей молока при термической нагрузке 794

Васильев И. Ю., Род В. А., Савельева О. А. Влияние ультразвукового воздействия на структурные и антимикробные свойства полимерных композиций на основе полиолефинов, дисперсно-наполненных бетулином 807

Кротова М. Г., Сафронов С. М., Гришаева И. Н., Неприятель А. А. Субстанции из пантов марала (*Cervus elaphus sibiricus*), полученные путем фракционирования – перспективный ингредиент для производства функциональных продуктов 819

Крылова И. В. Экстракция фенольных соединений из продуктов механического фракционирования подсолнечного шрота 833

Шафрай А. В., Попов А. М., Косинов В. С., Резниченко И. Ю., Бондарчук О. Н. Применение сверточных нейронных сетей для контроля показателей технологического потока производства гранулированных киселей 845

Сытова М. В., Терпугова Н. Ю., Мюге Н. С. Ветеринарно-санитарная экспертиза продукции из воблы (*Rutilus rutilus caspicus*) 856

Ле В. М., Веснина А. Д., Просеков А. Ю., Долганюк В. Ф., Ларичев Т. А., Юстратов В. П. Изучение воздействия растительных метаболитов на *Aliivibrio fischeri* и тест-штаммы представителей микробиоты ЖКТ 874

Осинцева М. А., Жидкова Е. А. Динамика формирования растительного покрова техногенно нарушенных участков в зависимости от мощности почвенной закладки и биологической активации (на примере угольного разреза) 885

Сухих С. А., Иванова С. А., Бахтиярова А. Х., Пшеничников С. Е., Левада Е. В., Бабич О. О. Цитотоксические, антиоксидантные и антибактериальные свойства экстрактов растений Восточной Прибалтики 904

Черниченко С. Г., Котов Р. М. Ключевые ориентиры финансового оздоровления товаропроизводителей в региональной системе антикризисного управления (на материалах сельскохозяйственных организаций Кемеровской области – Кузбасса) 918

CONTENTS

Kosovsky G. Yu., Glazko T. T. Dispersed and Tandem Repeats in Genomes and Genes of Some Mammalian Species 688

Borodina E. E., Gordienko A. V., Pleshivtsev I. I., Fotina N. V., Fedorova A. M., Martirosyan V. V. New *Pantoea* Strain as Antistress Agent and Growth Stimulator in Grain Growing .. 711

Lisitsyn A. B., Chernukha I. M., Nikitina M. A., Pchelkina V. A. Chemometrics in Laboratory Data Analysis 724

Simonenko E. S., Simonenko S. V., Zaletova T. S., Khitrov A. A., Semenova E. S., Begunova A. V., Samsonova I. S. Diet Therapy Fortified with Plant-Based Specialized Products to Prevent Cardiovascular Risk 744

Oganesyants L. A., Panasyuk A. L., Sviridov D. A., Ganin M. Yu. Isotope Mass Spectrometry and Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry in Honey Authentication 756

Popova E. A. Effect of Salinity on Secondary Metabolites and Antioxidant Activity in Callus Extracts of *Hyssopus officinalis* L. 768

Stepanov V. V., Sergeev A. A., Vechtomova E. A., Zarubin B. E., Perevozchikova M. A., Zaushintsena A. V. Meat Yield and Quality of *Lynx lynx* Linnaeus, 1758 779

Barkovskaya I. A., Yaryshev V. Yu., Bliadze V. G., Turovskaya S. N., Illarionova E. E., Kondratenko V. V., Galstyan A. G. Mathematical Assessment of Carbohydrate and Protein Profiles of Milk under Thermal Stress 795

Vasilyev I. Yu., Rod V. A., Saveleva O. A. Effect of Ultrasonication on Structural and Antimicrobial Properties of Polymer Compositions Based on Polyolefins Dispersed with Betulin 808

Krotova M. G., Safronov S. M., Grishaeva I. N., Nepriyatel A. A. Fractionated Substances from Maral (*Cervus elaphus sibiricus*) Velvet Antlers in Functional Foods 820

Krylova I. V. Extracting Phenolic Compounds from Products of Mechanically Fractionated Sunflower Meal 834

Shafrai A. V., Popov A. M., Kosinov V. S., Reznichenko I. Yu., Bondarchuk O. N. Convolutional Neural Networks in Granulated Kissel Production 846

Sytova M. V., Terpugova N. Yu., Mugue N. S. Veterinary and Sanitary Assessment of Caspian Roach Products (*Rutilus rutilus caspicus*) 857

Le V. M., Vesnina A. D., Prosekov A. Yu., Dolganyuk V. F., Larichev T. A., Yustratov V. P. Effects of Plant Metabolites on *Aliivibrio fischeri* and Test Strains of Gastrointestinal Microbiota 875

Osintseva M. A., Zhidkova E. A. Dynamics of Vegetation Development on Post-Mining Areas: Soil Thickness and Bioactivation 886

Sukhikh S. A., Ivanova S. A., Bakhtiyarova A. Kh., Pshenichnikov S. E., Levada K. V., Babich O. O. Cytotoxic, Antioxidant, and Antibacterial Properties of Eastern Baltic Plant Extracts 903

Chernichenko S. G., Kotov R. M. Key Benchmarks for Financial Recovery of Commodity Producers in the Regional System of Anti-Crisis Management: Agricultural Organizations of the Kemerovo Region 919