



FOOD METAENGINEERING

Пищевая Метаинженерия

Volume 3 | Issue 4 | 2025



■ FOOD METAENGINEERING

Научный рецензируемый журнал
No 4 | 2025
Периодичность издания — 4 номера в год
Основан в 2023 г.

■ Учредитель:

Федеральное государственное автономное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (ФГАНУ «ВНИМИ»)

■ Главный редактор

Галстян Арам Генрихович — доктор технических наук, академик РАН, профессор РАН, директор Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности (Москва, Российская Федерация)

■ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Заведующий редакцией журнала, академический редактор

Тихонова Елена Викторовна — кандидат исторических наук, доцент, Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации (Москва, Российская Федерация)

Ответственный секретарь

Рябова Анастасия Евгеньевна — доктор технических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности (Москва, Российская Федерация)

Туровская Светлана Николаевна — Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности (Москва, Российская Федерация). Технический секретарь.

Редактор по этике

Косычева Марина Александровна — доцент, кандидат филологических наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Российская Федерация)

- Рецензируемый научный журнал FOOD METAENGINEERING («ПИЩЕВАЯ МЕТАИНЖЕНЕРИЯ») зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 13 марта 2023 года (Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-84878 — сетевое издание).

■ Адрес:

115093, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35, корп. 7, к. 406
Тел. +7 (499) 236-32-23
E-mail: fme@vnimi.org
Официальный сайт учредителя: vnimi.org
Официальный сайт редакции: fme-journal.org

© ФГАНУ «ВНИМИ», 2025

■ FOOD METAENGINEERING

Scientific peer-reviewed journal
No 4 | 2025
Periodicity of publication — Quarterly
Published since 2023

■ Founder:

All-Russian Dairy Research Institute (VNIMI), Moscow, Russian Federation

■ Editor-in-Chief

Aram G. Galstyan — Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering, Professor, Director of the All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russian Federation

■ EDITORIAL OFFICE

Head of the Editorial Team, Academic Editor

Elena V. Tikhonova — Cand. Sci. (History), Assistant professor, Moscow State Institute of International Relations (University) of the Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

Executive Secretary

Anastasia E. Ryabova — Doctor of Engineering, All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russian Federation

Svetlana N. Turovskaya — All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russian Federation. Technical Secretary

Ethics Editor

Marina A. Kosycheva — Cand. Sci. (Philology), Assistant professor, National Research University «Higher School of Economics», Moscow, Russian Federation

- The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communication, Information Technologies and Mass Media. The Mass Media Registration Certificate EL No FS77-84878 dated March 13, 2023.

■ Address:

406 room, 35/7, Lyusinovskaya st., Moscow, Russian Federation, 115093
Tel. +7 (499) 236-32-23
E-mail: fme@vnimi.org
Official web site of Founder: vnimi.org
Official web site of the Editorial Office: fme-journal.org

© VNIMI, 2025

- **Абжанова Шолпан Аманкелдыкызы** —
доцент, кандидат технических наук, заведующая
кафедрой "Пищевая биотехнология" Алматинского
технологического университета, г. Алма-Ата,
Республика Казахстан
- **Асембаева Эльмира Куандыковна** —
PhD, ассоциированный профессор кафедры "Пищевая
биотехнология" Алматинского технологического
университета, г. Алма-Ата, Республика Казахстан
- **Бабич Ольга Олеговна** —
доцент, доктор технических наук, директор
Научно-образовательного центра «Промышленные
биотехнологии» Балтийского федерального
университета имени Иммануила Канта», г. Калининград,
Российская Федерация
- **Багиров Вугар Алинияз оглы** —
член-корреспондент РАН, профессор, доктор
биологических наук, Федеральный исследовательский
центр животноводства — ВИЖ им. акад. Л.К. Эрнста,
г. Подольск, Российская Федерация
- **Донник Ирина Михайловна** —
академик РАН, профессор, доктор биологических наук,
профессор Уральского государственного аграрного
университета, г. Екатеринбург, Российская Федерация
- **Евдокимов Иван Алексеевич** —
член-корреспондент РАН, профессор, доктор
технических наук, заведующий базовой кафедрой
технологии молока и молочных продуктов Северо-
Кавказского федерального университета, г. Ставрополь,
Российская Федерация
- **Кистаубаева Аида Сериковна** — профессор,
кандидат биологических наук, заведующая кафедрой
биотехнологии Казахского национального университета
имени аль-Фараби, г. Алма-Ата, Республика Казахстан
- **Линденбек Марио** —
доктор сельскохозяйственных наук, Business consulting
Lindenbeck, г. Берлин, Федеративная Республика
Германия
- **Лобачевский Яков Петрович** —
академик РАН, профессор, доктор технических наук,
первый заместитель директора Федерального научного
агроинженерного центра ВИМ, г. Москва, Российская
Федерация
- **Мартиросян Владимир Викторович** —
профессор РАН, доктор технических наук,
заместитель директора по научной работе
Научно-исследовательского института хлебопекарной
промышленности, г. Москва, Российская Федерация
- **Мельникова Елена Ивановна** —
профессор, доктор технических наук, профессор
кафедры технологии продуктов животного
происхождения Воронежского государственного
университета инженерных технологий г. Воронеж,
Российская Федерация
- **Петров Андрей Николаевич** —
академик РАН, доктор технических наук, главный
научный сотрудник Всероссийского научно-
исследовательского института молочной
промышленности, г. Москва, Российская Федерация
- **Поклар Ульрих Наташа** —
профессор, PhD, профессор биотехнического факультета
Люблянского университета, г. Любляна, Республика
Словения
- **Просеков Александр Юрьевич** —
академик РАН, профессор, доктор технических наук,
доктор биологических наук, ректор Кемеровского
государственного университета, г. Москва,
Российская Федерация
- **Семипятный Владислав Константинович** —
доктор технических наук, старший научный сотрудник
Всероссийского научно-исследовательского института
молочной промышленности, г. Москва, Российская
Федерация
- **Серба Елена Михайловна** —
член-корреспондент РАН, профессор РАН, доцент,
доктор биологических наук, заместитель директора
по научной работе Всероссийского научно-
исследовательского института пищевой биотехнологии,
г. Москва, Российская Федерация
- **Сложенкина Марина Ивановна** —
член-корреспондент РАН, профессор РАН, профессор,
доктор биологических наук, директор Поволжского
научно-исследовательского института производства
и переработки мясомолочной продукции, г. Волгоград,
Российская Федерация
- **Федотова Ольга Борисовна** —
старший научный сотрудник, доктор технических
наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского
научно-исследовательского института молочной
промышленности, г. Москва, Российская Федерация
- **Чернуха Ирина Михайловна** —
академик РАН, профессор, доктор технических наук,
руководитель отдела, главный научный сотрудник
Федерального научного центра пищевых систем
им. В. М. Горбатова» РАН, г. Москва, Российская
Федерация

- **Sholpan A. Abzhanova** —
Associate Professor, Candidate of Technical Sciences,
Head of the Department of Food Biotechnology, Almaty
Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan
- **Elmira K. Asembaeva** —
PhD, Associate Professor of the Department of Food
Biotechnology, Almaty Technological University, Almaty,
Republic of Kazakhstan
- **Olga O. Babich** —
Associate Professor, Doctor of Engineering, Director
of the Scientific and Educational Center «Industrial
Biotechnologies», Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russian Federation
- **Vugar A. Bagirov** —
Corresponding Member of the Russian Academy of
Sciences, Professor, Doctor of Biological Sciences, L.K. Ernst
Federal Science Center for Animal Husbandry, Podolsk,
Russian Federation
- **Irina M. Donnik** —
Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor,
Doctor of Biological Sciences, Professor at Ural State
Agrarian University, Yekaterinburg, Russian Federation
- **Ivan A. Evdokimov** —
Corresponding Member of the Russian Academy of
Sciences, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head
of the Specialized Department of Milk and Dairy Product
Technology, North-Caucasus Federal University, Stavropol,
Russian Federation
- **Aida S. Kistaubayeva** —
Associate Professor, Candidate of Biological Sciences, Head
of the Department of Biotechnology, Al-Farabi Kazakh
National University, Almaty, Republic of Kazakhstan
- **Mario Lindenbeck** —
Doctor of Agricultural Sciences, Business Consulting
Lindenbeck, Berlin, Federal Republic of Germany
- **Yakov P. Lobachevsky** —
Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor,
Doctor of Technical Sciences, First Deputy Director of the
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow,
Russian Federation
- **Vladimir V. Martirosyan** —
Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of
Technical Sciences, Deputy Director for Research, Scientific
Research Institute of the Baking Industry, Moscow, Russian
Federation
- **Elena I. Melnikova** —
Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the
Department of Technology of Animal Origin Products,
Voronezh State University of Engineering Technologies,
Voronezh, Russian Federation
- **Andrey N. Petrov** —
Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor
of Engineering, Chief Researcher, All-Russian Dairy Research
Institute, Moscow, Russian Federation
- **Natasha Poklar Ulrih** —
Professor, PhD, Professor at the Biotechnical Faculty,
University of Ljubljana, Ljubljana, Republic of Slovenia
- **Alexander Yu. Prosekov** —
Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor,
Doctor of Technical Sciences, Doctor of Biological Sciences,
Rector of Kemerovo State University, Kemerovo, Russian
Federation
- **Vladislav K. Semipyatny** —
Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, All-Russian
Dairy Research Institute, Moscow, Russian Federation
- **Elena M. Serba** —
Corresponding Member of the Russian
Academy of Sciences, Professor of the Russian Academy
of Sciences, Associate Professor,
Doctor of Biological Sciences, Deputy Director for Research,
All-Russian Research Institute of Food Biotechnology,
Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and
Food Safety, Moscow, Russian Federation
- **Marina I. Slozhenkina** —
Corresponding Member of the Russian Academy of
Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences,
Professor, Doctor of Biological Sciences, Director of the
Volga Research Institute for the Production and Processing
of Meat and Dairy Products, Volgograd, Russian Federation
- **Olga B. Fedotova** —
Senior Researcher, Doctor of Technical Sciences, Leading
Researcher of the All-Russian Dairy Research Institut,
Moscow, Russian Federation
- **Irina M. Chernukha** —
Academician of the Russian Academy
of Sciences, Professor, Doctor of Technical Sciences,
Head of Department, Chief Researcher, Federal Research
Center for Food Systems named after V. M. Gorbatov,
Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

РЕДАКТОРСКАЯ СТАТЬЯ

А.Е. Рябова

Воспроизводимость, стандарты данных и метаданные как инфраструктурные основания пищевой
метаинженерии: редакционная позиция 7

ОРИГИНАЛЬНОЕ ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В.В. Никитин, А.Н. Сучков, Р.Б. Савицкий, И.Т. Онацкий

Исследование теплоизоляционных свойств термочехлов для укрытия паллет с пищевой продукцией
при заданных температурных режимах.....14

Д.Д. Коваль, В.А. Ратайчук, А.В. Хан, Е.Г. Лазарева, О.Ю. Фоменко

Динамика микробного сообщества кисломолочного напитка, приготовленного с использованием
кефирных грибов.....32

С.Л. Белецкий, Н.В. Линовская, Н.Н. Потрахов, К.К. Гук

Неразрушающий экспресс-метод оценки качества какао-бобов55

О.Г. Шабалдас

Биохимический состав и пищевая ценность зерна сортов сои различных групп спелости, возделываемых
в условиях юга России.....73

EDITORIAL

Anastasia E. Ryabova

Reproducibility, Data Standards, and Metadata as Infrastructural Foundations of Food Metaengineering:

An Editorial Position..... 7

ORIGINAL EMPIRICAL RESEARCH

Vladimir V. Nikitin, Alexander N. Suchkov, Roman B. Savitskiy, Ilya T. Onatskiy

Study of the Thermal Insulation Properties of Thermal Covers for Pallets with Food Products

under Specified Temperature Conditions.....14

Daria D. Koval, Viktor A. Rataichuk, Alexey V. Khan, Ekaterina G. Lazareva, Oleg Yu. Fomenko

The Dynamics of the Microbial Community of a Fermented Milk Beverage Produced Using Kefir Grains.....32

Sergey L. Beletskiy, Natalya V. Linovskaya, Nikolai N. Potrakhov, Karina K. Guk

Nondestructive Rapid Method for Assessing Cocoa Bean Quality.....55

Olga G. Shabaldas

Influence of Climatic Conditions on the Biochemical Composition and Nutritional Value of Soybean Grain Varieties.....73

Воспроизводимость, стандарты данных и метаданные как инфраструктурные основания пищевой метаинженерии: редакционная позиция

А.Е. Рябова

Всероссийский
научно-исследовательский
институт молочной
промышленности, г. Москва,
Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Пищевая метаинженерия ориентирована на получение переносимых, инженерно интерпретируемых результатов, связывающих состав, структуру и параметры процесса с функциональными свойствами продукта. Однако достижение переносимости результатов ограничивается не столько дефицитом методов, сколько неоднородностью представления данных, недостаточностью метаданных статей и неполнотой протокольных описаний, что снижает воспроизводимость и затрудняет повторное использование результатов.

Цель: Представить редакционную позицию относительно роли стандартов данных и практик воспроизводимости в пищевой метаинженерии и предложить минимальный набор требований к рукописям, обеспечивающий проверяемость, сопоставимость и индустриальную пригодность результатов исследований.

Обоснование: Аннотационная аргументация опирается на междисциплинарные рамки воспроизводимости и репликации, принципы FAIR, практику минимальных стандартов информации в смежных областях исследований, а также на издательские политики в части доступности данных, материалов, кода и протоколов.

Основные положения. (1) Публикация в метаинженерной логике должна рассматриваться как воспроизводимый пакет доказательств, а не как описательное сообщение. (2) FAIR следует трактовать как критерии пригодности данных и связанных цифровых артефактов к повторному использованию, включая машинную интероперабельность и прослеживаемость происхождения. (3) Для ключевых поддоменов пищевых исследований требуется институционализация «минимальной информации» о сырье, процессах, пробоподготовке и аналитике. (4) Вычислительная воспроизводимость (код, параметры, версии окружения) становится обязательной там, где выводы зависят от цифровой обработки. (5) Стандартизированное цитирование пищевых данных повышает прослеживаемость и качество вторичного использования.

Заключение: Предлагается минимальный редакционный стандарт, включающий обязательное заявление о доступности данных, предоставление протоколов и структурированных метаданных, публикацию вычислительных артефактов при наличии вычислительной компоненты, корректную идентификацию и цитирование наборов пищевых данных и явное описание ограничений доступа. Ожидаемый эффект состоит в повышении сопоставимости исследований, снижении транзакционных издержек повторного использования и укреплении взаимосвязи «лаборатория—производство» для результатов исследований в области пищевой метаинженерии.

Ключевые слова: воспроизводимость; репликация; стандарты данных; метаданные; протоколы; FAIR; управление данными исследований; вычислительная воспроизводимость; доступность данных; цитирование данных; прозрачность методов; редакционная политика; повторное использование данных; индустриальная переносимость результатов; открытая наука

Корреспонденция:

Анастасия Евгеньевна Рябова
E-mail: a_ryabova@vniimi.org

Конфликт интересов:

автор сообщает
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 01.11.2025

Принята: 15.12.2025

Опубликована: 30.12.2025

Copyright: © 2025 Автор



Для цитирования: Рябова, А.Е. (2025). Воспроизводимость, стандарты данных и метаданные как инфраструктурные основания пищевой метаинженерии: редакционная позиция. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 7–13. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.102>

Reproducibility, Data Standards, and Metadata as Infrastructural Foundations of Food Metaengineering: An Editorial Position

Anastasia E. Ryabova

All-Russian Dairy Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: The conclusion section in field reviews remains one of the most vulnerable components of academic writing. Authors often reproduce the rhetorical pattern of empirical articles, limiting the conclusion to a descriptive summary of identified themes and findings. Unlike empirical research, where the conclusion summarizes the author's own data, a field review requires an integrative and normative ending that delineates the boundaries of the field, identifies areas of consensus and gaps in research, and outlines directions for future inquiry. Although international guidelines for systematic reviews exist, they do not account for the genre-specific characteristics of field reviews, in which the conclusion must combine analytical, metatheoretical, and pragmatic functions.

Purpose: To propose an operationalizable rhetorical model for writing the conclusion section of a field review. The model integrates analytical approaches from genre analysis with the principles of transparent academic writing and strategic hedging.

Results: The paper identifies five functional components of the conclusion: (1) outlining the review's contribution to theory, methodology, and practice; (2) defining the boundaries of transferability of the synthesized findings; (3) articulating a realistic research agenda for the field; (4) indicating the limitations of the review and potential sources of bias; and (5) formulating a final integrative statement that captures the current state of the field. Based on these functions, a seven-move rhetorical structure is proposed, comprising the redefinition of the field frame, the formulation of integrative claims, theoretical and methodological implications, practical applications, limitations, and a final metatextual statement. Particular attention is given to the principles of readability and structural signaling, as well as to the calibration of claim strength through strategic hedging, ensuring a balance between scholarly caution and persuasive synthesis. The article also introduces a checklist and a set of quality metrics to enhance the reproducibility and evaluability of the rhetorical organization of field review conclusions.

Conclusion: The proposed model makes the process of writing the conclusion section in a field review systematic and manageable, transforming it from a formal summary into a tool for integrating and standardizing knowledge within a disciplinary domain. It enhances analytical density, interdisciplinary comparability, and transparency of scientific reasoning, aligning with contemporary standards of evidence-based and rhetorically competent academic writing.

Keywords: reproducibility; replication; data standards; metadata; protocols; FAIR; research data management; computational reproducibility; data availability; data citation; method transparency; editorial policy; data reuse; industrial transferability of results; open science

Correspondence:

Anastasia E. Ryabova

E-mail: a_ryabova@vniimi.org

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 01.11.2025

Accepted: 15.12.2025

Published: 30.12.2025

Copyright: © 2025 The Author



To cite: Ryabova, A.E. (2025). Reproducibility, Data Standards, and Metadata as Infrastructural Foundations of Food Metaengineering: An Editorial Position. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 7–13. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.102>

Пищевая метаинженерия как исследовательская и технологическая повестка предполагает переход от локально оптимизированных решений к переносимым инженерным знаниям: результат должен воспроизводиться на другой линии, в другой лаборатории, при иных партиях сырья с заранее очерченными границами применимости. Именно поэтому для метаинженерии критичны не только новые модели, ингредиенты или методы структурирования, но и качество доказательной инфраструктуры: данных, метаданных, протоколов и вычислительных процедур, лежащих под публикацией.

В последние годы научное сообщество на уровне междисциплинарной дискуссии фактически признало, что дефицит воспроизводимости является системной проблемой современной науки (Тихонова & Косычева, 2024). Эмпирические свидетельства этого явления обсуждаются открыто, включая данные массовых опросов исследователей (Baker, 2016) и аналитические аргументы о том, почему многие опубликованные результаты оказываются нестабильными при повторных проверках (Ioannidis, 2005). Исследователи разводят понятия воспроизводимости (*reproducibility*) и репликация (*replicability*) и подчеркивают: для вычислительных исследований воспроизводимость требует доступности данных, кода и прозрачного описания процедур анализа (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019). Для пищевых исследований эта повестка не является внешним «методологическим импортом»: специфика пищевых систем (контекстная вариативность сырья и процесса, чувствительность к деталям пробоподготовки и оборудования, многомерность конечных показателей) делает проблему воспроизводимости особенно практико-значимой.

Публикация как воспроизводимый объект, а не как повествование

Редакционная позиция, которую целесообразно артикулировать в журнале по пищевой метаинженерии, сводится к следующему: публикация должна рассматриваться как минимально достаточный пакет для независимой проверки и повторного использования результатов. Такой подход не означает требование «открыть все» в любом контексте (включая промышленную конфиденциальность). Речь идет о том, чтобы статья содержала проверяемую связь между выводами и их эмпирической/вычислительной основой, а также четко фиксировала условия, при которых результат получен.

Подобные требования уже закреплены в политике ведущих издательских платформ. Например, Nature Portfolio прямо формулирует принцип, согласно которому материалы, данные, код и протоколы должны быть доступными для того, чтобы другие исследователи могли воспроизвести и развивать опубликованные утверждения; ограничения должны быть декларированы при подаче рукописи (Nature Food Editorial Policies, n.d.). Springer Nature, в свою очередь, институционализирует роль заявления о доступности данных (*data availability statement*) как связующего звена между результатами статьи и доказательной базой (Springer Nature, n.d.). Эти нормы не подменяют научного качества «формальными чек-листами», но задают базовый уровень прозрачности, без которого метаинженерный статус исследования оказывается трудно обосновать.

FAIR как практический язык повторного использования

В научных дискуссиях часто происходит подмена: принципы управления исследовательскими данными FAIR трактуют как синоним «открытости». Изначально эти принципы были предложены как критерии того, насколько данные (и связанные цифровые объекты) пригодны для поиска, доступа, интероперабельности и повторного использования, в том числе машинного (Wilkinson et al., 2016). В контексте пищевой метаинженерии принципы FAIR означают конкретные требования:

1. находимость (устойчивые идентификаторы, корректные ссылки, индексируемые репозитории);
2. доступность (явные условия доступа и лицензирования, включая варианты «ограниченного доступа»);
3. интероперабельность (структурированные метаданные, контролируемые словари, единицы измерения);
4. повторное использование (описание происхождения данных, процедур их получения и обработки, версий инструментов).

Принципиально важно, что инициатива FAIR — это не абстрактная декларация, а технология снижения транзакционных издержек: данные и протоколы становятся реально переносимыми, а не «восстанавливаемыми по переписке».

Минимальные стандарты информации

Пищевые исследования часто развиваются в режиме высоко вариативных протоколов, где критические параметры остаются «неявным знанием» лаборатории. В таких

условиях полезен опыт дисциплин, которые сталкивались с аналогичной проблемой и отвечали институциональными «минимальными стандартами информации». Классический пример — MIAPE¹, разработанный как минимальный набор информации, необходимый для интерпретации и независимой проверки экспериментов на микрочипах (Brazma et al., 2001). В протеомике аналогичную роль сыграл MIAPE², фиксирующий минимальные требования к описанию эксперимента и данных (Taylor et al., 2007). Смысл подобных стандартов не в том, чтобы «зарегулировать» исследование; напротив, они задают нижнюю границу, ниже которой публикация перестает быть воспроизводимым научным объектом.

Для пищевой метаинженерии логичным представляется развитие аналогичных профилей «минимальной информации» хотя бы в ключевых поддоменах, например, для исследований, где результат определяется:

- (а) процессом ферментации и микробными сообществами;
- (б) структурированием белков и формированием текстов;
- (в) коллоидными системами (эмульсии, пены, гели);
- (г) дегидратацией/сушкой и изменением матрицы;
- (д) сенсорными протоколами и панелями.

Уже на уровне журналов возможно определить базовые поля метаданных (сырьё/партии/условия хранения; оборудование и режимы; пробоподготовка; калибровки; статистические решения; критерии исключения данных). Это те элементы, без которых сравнение и переносимость между исследованиями превращаются в догадку.

Вычислительная воспроизводимость

Даже когда предмет исследования кажется преимущественно «материальным» (сырьё–процесс–продукт), публикационные выводы все чаще зависят от вычислительных процедур: обработки спектров и изображений, фильтрации сигналов, сложной статистики, машинного обучения. В этом случае отсутствие кода, параметров и версий окружения делает результат принципиально невозпроизводимым при наличии исходных измерений. Инициативы вроде CODECHECK³ предлагают практический механизм: независимую проверку того, что предоставленные автором вычислительные артефакты действительно воспроизводят ключевые таблицы и рисунки статьи (Nüst & Eglén, 2021). Для журналов метаинженерной направленности такая логика особенно релевантна: если заявляется переносимость и предсказуемость, то вычислительная цепочка должна быть проверяемой.

Стандарты цитирования данных как элемент «индустриальной пригодности» публикаций

Пищевая метаинженерия, ориентированная на промышленную применимость, неизбежно сталкивается с необходимостью корректной идентификации источников данных: таблиц состава продуктов, баз нутриентов, справочников, корпоративных датасетов. Недавняя работа в области нутрициологии предложила Comprehensive Food Data Citation checklist⁴ как попытку стандартизировать цитирование пищевых данных и сделать их происхождение прозрачным для авторов и рецензентов (Forester et al., 2023). Для метаинженерии этот вектор важен не только этически, но и инструментально: прослеживаемость данных — предпосылка оценки их качества и пригодности для принятия технологических решений.

¹ MIAPE (Minimum Information About a Microarray Experiment) — стандарт минимальной информации, необходимой для однозначной интерпретации и потенциального воспроизведения результатов экспериментов на микрочипах (геномика, транскриптомика). Включает описание сырья, дизайна эксперимента, протоколов гибридизации, нормализации и сырых/обработанных данных. Разработан FGED Society в 2001 году.

² MIAPE (Minimum Information About a Proteomics Experiment) — стандарт минимальной информации для описания протеомных экспериментов, обеспечивающий воспроизводимость и интерпретацию результатов. Охватывает экспериментальный дизайн, подготовку образцов, методы разделения/идентификации белков, масс-спектрометрию и обработку данных. Разработан Proteomics Standards Initiative (PSI) в 2007 году.

³ CODECHECK — инициатива открытой науки по независимой проверке воспроизводимости вычислительных результатов научных статей. Кодчекер заново запускает предоставленный код и данные, подтверждая, что они воспроизводят ключевые фигуры/таблицы. Успешная проверка выдает сертификат «certificate of executable computation».

⁴ Comprehensive Food Data Citation (CFDC) checklist — чек-лист для стандартизированного цитирования данных о составе пищевых продуктов (food composition data), обеспечивающий прозрачность происхождения, источника и контекста данных для повышения воспроизводимости исследований в области питания. Разработан на основе бенчмаркинга существующих стандартов цитирования данных; первый специализированный инструмент такого рода в пищевой науке. Предназначен как руководство для авторов, рецензентов и издателей (Forester et al., 2023; доступен интерактивно на <https://www.nutrientinstitute.org/cfdc>).

Редакционная рамка: что разумно требовать «по умолчанию»

С учетом изложенного представляется оправданным минимальный, но строгий набор ожиданий к рукописям, позиционируемым как вклад в пищевую метаинженерию:

1. Заявление о доступности данных с понятными условиями доступа и ссылками на репозитории (Springer Nature, n.d.).
2. Доступность протоколов (в приложении или в версионизируемом репозитории), включая критические параметры процесса и пробоподготовки.
3. Структурированные метаданные о сырье и процессе как отдельный элемент статьи (таблица или стандартизированный раздел).
4. Вычислительный пакет (код/ноутбуки/скрипты, версии библиотек и ПО, параметры анализа), если выводы зависят от вычислений (National Academies

of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019; Nüst & Eglen, 2021).

5. Корректное цитирование и идентификация использованных пищевых данных, особенно при работе с таблицами состава и базами нутриентов (Forester et al., 2023).
6. Явное описание ограничений воспроизводимости, если данные/материалы не могут быть полностью раскрыты, с указанием причин и возможных процедур доступа (Nature Food Editorial Policies, n.d.).

Эта рамка не заменяет научной новизны и не гарантирует качества интерпретации. Однако она делает возможным главное: превращает публикации из единичных сообщений в элементы накопления переносимого знания. Для пищевой метаинженерии это и есть условие развития: дисциплина становится инженерной не тогда, когда использует сложные термины, а тогда, когда её результаты устойчиво воспроизводимы и повторно используемы.

ЛИТЕРАТУРА

- Тихонова Е.В., & Косычева М.А. (2024). Политика журнала в отношении доступности данных: вызовы и возможности. *Health, Food & Biotechnology*, 6(4), 6–20. <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i4.s251>
- Baker M. (2016). 1,500 scientists lift the lid on reproducibility. *Nature*, 533(7604), 452–454. <https://doi.org/10.1038/533452a>
- Brazma, A., Hingamp, P., Quackenbush, J., Sherlock, G., Spellman, P., Stoeckert, C., Aach, J., Ansorge, W., Ball, C. A., Causton, H. C., Gaasterland, T., Glenisson, P., Holstege, F. C., Kim, I. F., Markowitz, V., Matese, J. C., Parkinson, H., Robinson, A., Sarkans, U., Schulze-Kremer, S., ... Vingron, M. (2001). Minimum information about a microarray experiment (MIAME) — Toward standards for microarray data. *Nature Genetics*, 29(4), 365–371. <https://doi.org/10.1038/ng1201-365>
- Forester, S., Jennings-Dobbs, E., & Burton-Freeman, B. (2023). Development of a Comprehensive Food Data Citation Standard: A Surprising Gap in the Nutrition Research Literature. *Current developments in nutrition*, 8(1), 102048. <https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2023.102048>
- Ioannidis J. P. (2005). Why most published research findings are false. *PLoS Medicine*, 2(8), e124. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0020124>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). *Reproducibility and replicability in science*. The National Academies Press.
- Nature Food Editorial Policies. (n.d.). *Reporting standards and availability of data, materials, code and protocols*. *Nature Food*.
- Nüst, D., & Eglen, S. J. (2021). CODECHECK: an Open Science initiative for the independent execution of computations underlying research articles during peer review to improve reproducibility. *F1000Research*, 10, 253. <https://doi.org/10.12688/f1000research.51738.2>
- Springer Nature. (n.d.). *Data availability statements: Guidance for authors and editors*. Springer Nature.

- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J. W., da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., Gonzalez-Beltran, A., ... Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific data*, 3, 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- Taylor, C. F., Paton, N. W., Lilley, K. S., Binz, P.-A., Julian, R. K., Jones, A. R., Zhu, W., Apweiler, R., Aebersold, R., Deutsch, E. W., Dunn, M. J., Heck, A. J. R., Leitner, A., Macht, M., Mann, M., Martens, L., Neubert, T. A., Patterson, S. D., Ping, P., ... Hermjakob, H. (2007). The minimum information about a proteomics experiment (MIAPE). *Nature Biotechnology*, 25(8), 887–893.

REFERENCES

- Tikhonova, E.V., & Kosycheva, M.A. (2024). Journal data accessibility policies: challenges and opportunities. *Health, Food & Biotechnology*, 6(4), 6–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i4.s251>
- Baker M. (2016). 1,500 scientists lift the lid on reproducibility. *Nature*, 533(7604), 452–454. <https://doi.org/10.1038/533452a>
- Brazma, A., Hingamp, P., Quackenbush, J., Sherlock, G., Spellman, P., Stoeckert, C., Aach, J., Ansorge, W., Ball, C. A., Causton, H. C., Gaasterland, T., Glenisson, P., Holstege, F. C., Kim, I. F., Markowitz, V., Matese, J. C., Parkinson, H., Robinson, A., Sarkans, U., Schulze-Kremer, S., ... Vingron, M. (2001). Minimum information about a microarray experiment (MIAME) - Toward standards for microarray data. *Nature Genetics*, 29(4), 365–371. <https://doi.org/10.1038/ng1201-365>
- Forester, S., Jennings-Dobbs, E., & Burton-Freeman, B. (2023). Development of a Comprehensive Food Data Citation Standard: A Surprising Gap in the Nutrition Research Literature. *Current developments in nutrition*, 8(1), 102048. <https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2023.102048>
- Ioannidis J. P. (2005). Why most published research findings are false. *PLoS medicine*, 2(8), e124. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0020124>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). *Reproducibility and replicability in science*. The National Academies Press.
- Nature Food Editorial Policies. (n.d.). *Reporting standards and availability of data, materials, code and protocols*. Nature Food.
- Nüst, D., & Eglen, S. J. (2021). CODECHECK: an Open Science initiative for the independent execution of computations underlying research articles during peer review to improve reproducibility. *F1000Research*, 10, 253. <https://doi.org/10.12688/f1000research.51738.2>
- Springer Nature. (n.d.). *Data availability statements: Guidance for authors and editors*. Springer Nature.
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J. W., da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., Gonzalez-Beltran, A., ... Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3, 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- Taylor, C. F., Paton, N. W., Lilley, K. S., Binz, P.-A., Julian, R. K., Jones, A. R., Zhu, W., Apweiler, R., Aebersold, R., Deutsch, E. W., Dunn, M. J., Heck, A. J. R., Leitner, A., Macht, M., Mann, M., Martens, L., Neubert, T. A., Patterson, S. D., Ping, P., ... Hermjakob, H. (2007). The minimum information about a proteomics experiment (MIAPE). *Nature Biotechnology*, 25(8), 887–893.

ОБ АВТОРЕ

Рябова Анастасия Евгеньевна, доктор технических наук, заместитель директора по образованию, старший научный сотрудник лаборатории технологий молочных продуктов Федерального государственного автономного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35, корп. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5712-2020>, Scopus ID: 56496797800, Researcher ID: R-8359-2018, SPIN-код: 8425-8422, a_ryabova@vnimi.org

ABOUT THE AUTHOR

Ryabova Anastasia Evgenievna, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Education, Senior Researcher of the Laboratory of Dairy Product Technologies at the All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya street, 35, bld. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5712-2020>, Scopus ID: 56496797800, Researcher ID: R-8359-2018, SPIN-code: 8425-8422, a_ryabova@vnimi.org

Исследование теплоизоляционных свойств термочехлов для укрытия паллет с пищевой продукцией при заданных температурных режимах

В.В. Никитин, А.Н. Сучков, Р.Б. Савицкий, И.Т. Онацкий

ВНИИХ — филиал ФГБНУ
«ФНЦ пищевых систем
им. В.М. Горбатова» РАН, г. Москва,
Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Непрерывность холодильной цепи при транспортировании и хранении скоропортящихся пищевых продуктов в большой степени зависит от эффективности вспомогательных средств термозащиты, включая термочехлы для укрытия паллет. Недостаточная теплоизоляция может привести к нарушению температурного режима, ускоренной порче продукции и экономическим потерям.

Цель: Оценить и сравнить теплоизоляционные свойства коммерческих образцов трехслойных термочехлов, предназначенных для укрытия паллет с пищевой продукцией, при имитации типичных условий погрузочно-разгрузочных операций.

Материалы и методы: Исследования проведены в теплоизолированной камере. В качестве модельного груза использовали реальные продукты (салат «Оливье») и имитаторы с эквивалентными теплофизическими характеристиками. Плотность теплового потока измеряли с помощью измерителя ИТП-МГ4.03 «Поток», коэффициент теплопередачи (k) рассчитывали по стандартной методике. Температуру продукта регистрировали в течение 12 ч.

Результаты: Установлена прямая корреляция между коэффициентом теплопередачи термочехлов и продолжительностью сохранения безопасной температуры скоропортящейся продукции (7,0 °C). Наилучшие изоляционные свойства продемонстрировал термочехол с $k = 0,63 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, обеспечивший сохранение безопасной температуры продукции в течение 58 мин. Худшие характеристики показал термочехол с $k = 1,09 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, под которым температура продукции достигла 7,0 °C уже через 28 мин.

Заключение: Коэффициент теплопередачи является надежным индикатором эффективности термочехлов при кратковременных нарушениях холодильной цепи. Полученные данные позволяют оценить термозащитные материалы и обоснованно выбрать решения, способствующие снижению потерь и повышению устойчивости холодильной цепи.

Ключевые слова: холодильная цепь; хранение; температурные режимы; термочехлы; теплофизические свойства; пищевые продукты

Корреспонденция:

Владимир Владиславович
Никитин

E-mail: vnikh@fncps.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 02.10.2025

Принята: 15.12.2025

Опубликована: 30.12.2025

Финансирование:

Статья подготовлена в рамках
выполнения НИР по теме
№ FGUS 2025 0004
государственного задания
ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем
им. В.М. Горбатова» РАН

Copyright: © 2025 Авторы



Для цитирования: Никитин, В.В., Сучков, А.Н., Савицкий, Р.Б., & Онацкий, И.Т. (2025). Исследование теплоизоляционных свойств термочехлов для укрытия паллет с пищевой продукцией при заданных температурных режимах. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 14-31. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.95>

Study of the Thermal Insulation Properties of Thermal Covers for Pallets with Food Products under Specified Temperature Conditions

Vladimir V. Nikitin, Alexander N. Suchkov, Roman B. Savitskiy, Ilya T. Onatskiy

All-Russian Scientific Research
Institute of Refrigeration
Industry — Branch
of V. M. Gorbato Federal Research
Center for Food Systems of RAS,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: The continuity of the cold chain during transportation and storage of perishable food products largely depends on the effectiveness of auxiliary thermal protection means, including thermal covers for pallets. Inadequate thermal insulation can lead to temperature deviations, accelerated product spoilage, and economic losses.

Purpose: To evaluate and compare the thermal insulation properties of commercial samples of three-layer thermal covers designed for pallets with food products, under simulated typical loading and unloading conditions.

Materials and Methods: The studies were carried out in a thermally insulated chamber. Real food products (Olivier salad) and simulators with equivalent thermophysical properties were used as model cargo. Heat flux density was measured using the ITP-MG4.03 «Potok» heat flux meter, and the heat transfer coefficient was calculated according to a standard methodology. Product temperature was recorded continuously over a period of 12 hours.

Results: A direct correlation was established between the heat transfer coefficient (k) of thermal covers and the time required for perishable food products to reach the critical temperature of 7,0 °C. The best thermal insulation performance was demonstrated by the cover with $k = 0,63 \text{ W}/(\text{m}_2 \cdot \text{K})$, which maintained a safe product temperature for 58 minutes. The poorest performance was observed for the cover with $k = 1,09 \text{ W}/(\text{m}_2 \cdot \text{K})$, under which the product temperature reached 7,0 °C in just 28 minutes.

Conclusion: The heat transfer coefficient is a reliable indicator of thermal cover effectiveness during short-term cold chain disruptions. The obtained data enable objective evaluation of thermal protection materials and support informed selection of solutions aimed at reducing losses and enhancing cold chain resilience.

Keywords: cold chain; storage; temperature regimes; thermal covers; thermophysical properties; food products

Correspondence:

Vladimir V. Nikitin

E-mail: v.nikitin@fncps.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 02.10.2025

Accepted: 15.12.2025

Published: 30.12.2025

Funding:

The article was prepared within the framework of the research project No. FGUS-2025-0004 under the State Assignment of the Federal Research Center of Food Systems named after V.M. Gorbato, Russian Academy of Sciences (FRC FS RAS)

Copyright: © 2025 The Authors



To cite: Nikitin, V.V., Suchkov, A.N., Savitskiy, R.B., & Onatskiy, I.T. (2025). Study of the thermal insulation properties of thermal covers for pallets with food products under specified temperature conditions. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 14-31. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.95>

ВВЕДЕНИЕ

В экономически развитых странах затраты на сохранение произведенной пищевой продукции в значительной степени компенсируются за счет снижения потерь на этапах хранения, транспортирования и реализации конечному потребителю (Rodriguez, 2016; Тяпухин, 2021). Ключевым фактором достижения данного эффекта стало формирование непрерывной холодильной цепи, развитие которой началось в 1980-е годы и сопровождалось внедрением нормативных документов и специализированных технических средств (Тертеров, 1981). В СССР ее формирование происходило значительно медленнее вследствие дефицита холодильного оборудования, ограниченных возможностей управления и отсутствия эффективных механизмов прослеживаемости. Указанные ограничения во многом сохраняют актуальность и в настоящее время, что обуславливает значительные объемы продовольственных потерь в России (Kornienko, 2020).

Непрерывная холодильная цепь рассматривается как системообразующий элемент минимизации потерь, сохранения качества и обеспечения безопасности скоропортящихся пищевых продуктов на всем протяжении их движения от производителя до потребителя (Hoang, 2011; Андреев, 2016; Han, 2021; Tan, 2025). Контроль параметров окружающей среды является критически важным, поскольку большинство скоропортящихся продуктов характеризуется высокой термочувствительностью и быстрым ухудшением потребительских свойств при отклонении от регламентированных температурных режимов (Ren, 2022; Zhang, 2017).

Вместе с тем многоуровневая структура холодильной цепи (Yan, 2021; Lu, 2022) и ее высокая зависимость от технической и инфраструктурной оснащенности (Zheng, 2022) определяют ее уязвимость к широкому спектру рисков. К числу основных факторов риска относятся человеческий фактор (Wang, 2024), недостатки упаковки (Ali, 2018; Wang, 2022), климатические воздействия, технические неисправности и управленческие ошибки (Li, 2022), что в совокупности формирует высокую степень сложности и нестабильности функционирования холодильной цепи (Latha, 2023).

Дополнительную угрозу представляют преднамеренные отключения холодильного оборудования, приводящие к локальным разрывам холодильной цепи (Bai, 2023). Нарушения температурных режимов на этапах

транспортирования и хранения существенно увеличивают масштабы потерь продукции (Ndraha, 2018; Onwude, 2023), снижая рентабельность производителей и увеличивая издержки для конечных потребителей (Yang, 2017).

Риски нормативного и регуляторного характера усиливаются многоуровневостью и фрагментарностью требований, что обуславливает необходимость внедрения прозрачных механизмов контроля и координированных управленческих решений. Согласованная государственная политика в данной области способствует соблюдению международных и экологических стандартов, а также повышает устойчивость и операционную эффективность холодильной цепи (Dai, 2020; Bal, 2021; Zhang, 2022).

Несмотря на значительный массив исследований, посвященных отдельным элементам холодильной цепи, системный анализ всей цепи поставок охлажденной и замороженной продукции остается недостаточно разработанным (Большаков, 1998; Ворон, 2014; Настасиевич, 2017; Корниенко, 2021). Одной из ключевых методологических проблем является сложность количественной оценки потерь на каждом конкретном участке цепи (Gustavsson, 2011; Parfitt, 2010; Stuart, 2009).

Даже при строгом соблюдении регламентированных температурных режимов на этапах производства и складского хранения качество продукции может существенно изменяться на последующих этапах логистической цепи (Тяпухин, 2018; 2020). При этом действующие нормативные документы, как правило, рассматривают технологический цикл завершенным на складе производителя, не учитывая изменения, возникающие в процессе транспортирования, распределительного хранения и реализации. Между тем именно данные этапы оказывают значительное влияние на конечное качество и безопасность продуктов, поступающих к потребителю (Белозеров, 2007).

В этой связи технологическая документация должна содержать научно обоснованные требования к температурно-влажностным режимам, срокам годности и другим параметрам качества на каждом этапе холодильной цепи (Белозеров, 2012). Техническая инфраструктура холодильной цепи включает производственные и распределительные холодильники, охлаждаемые транспортные средства, торговое холодильное оборудование и холодильные комплексы общественного питания, обеспечивающие непрерывность температурного контроля от момента выхода продукции из произ-

водства до ее реализации (Белозеров, 2007; Белозеров, 2012; Бараненко, 2010; Корниенко, 2021).

На динамику изменения качества продукции влияет не только абсолютное значение температуры, но и ее стабильность во времени. Значительные и длительные колебания температуры сопровождаются ростом внутренней температуры продукта и ускорением процессов, приводящих к их порче (Никитин, 2025). Существенное значение также имеют равномерность температурно-влажностного режима и интенсивность воздухообмена.

Повышение устойчивости продукции к температурным колебаниям возможно не только за счет понижения температур хранения, но и посредством применения дополнительных технологических решений, ограничивающих тепловое взаимодействие продукции с окружающей средой (Румянцева, 2009). В частности, установлено, что применение термостатирующих упаковок позволяет существенно снизить амплитуду температурных колебаний на поверхности продукта. Использование многослойной пузырчатой пленки с высоким сопротивлением теплопередаче уменьшает амплитуду температурных колебаний примерно в два раза, однако такие решения имеют ограниченную эффективность при внутригородских перевозках охлажденной мясной продукции (Корниенко, 2018).

Нарушения температурного режима наиболее часто возникают при загрузке, разгрузке, транспортировании, складировании и подготовке продукции к реализации (Nychas, 2008; Raab, 2011; Zhao, 2022; Lei, 2023). Многократные логистические операции создают условия для кратковременных, но систематических отклонений от регламентированных условий хранения, что в совокупности приводит к ускоренной порче продукции (Шачек, 2023).

Применение теплоизолирующих термочехлов позволяет компенсировать температурные колебания воздуха в кузове рефрижератора при открытии дверей и стабилизировать температуру продукта на уровне начальной загрузки. Однако, несмотря на рост практического использования термочехлов, в научной литературе отсутствуют систематизированные данные о теплофизических характеристиках коммерческих образцов и их влиянии на продолжительность поддержания безопасной температуры продукции при нарушениях холодильной цепи (Корниенко, 2018). Данный пробел затрудняет обоснованный выбор термочехлов и их интеграцию в регламенты холодильной цепи.

В настоящем исследовании выдвинута гипотеза о наличии зависимости между базовыми теплофизическими характеристиками термочехлов и продолжительностью сохранения безопасной температуры продукции. Целью работы являлось экспериментальное определение и сравнительный анализ теплофизических характеристик различных типов термочехлов с установлением их влияния на продолжительность сохранения безопасного температурного режима охлажденной скоропортящейся пищевой продукции при имитации кратковременных нарушений холодильной цепи. Исследование выполнено методом температурного мониторинга в теплоизолированной камере.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

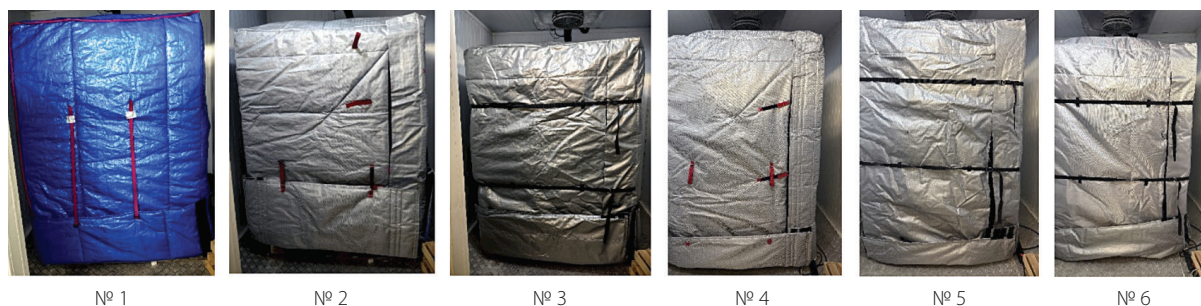
Объектами исследования являлись шесть образцов трехслойных термочехлов, предназначенных для укрытия паллет с пищевой продукцией (Рисунок 1). Образцы

Рисунок 1

Объекты исследования

Figure 1

Objects of Research



В.В. Никитин, А.Н. Сучков, Р.Б. Савицкий, И.Т. Онацкий

изготовлены различными производителями в соответствии с техническими требованиями (Таблица 1).

Таблица 1

Основные технические требования к термочехлам

Table 1

Main Technical Requirements for Thermal Covers

Геометрические размеры		
Параметр	Числовое значение	
Внутренний размер, мм	1220×822×2100	
Толщина, мм	25–30	
Конструкция и состав		
Корпус состоит из 5 граней, 4 боковых и 1 верхней		
Слой	Предназначение	Материал
Внешнепокрывной, внутренний	Защита внутренних слоев термочехла от механических повреждений и влаги	В соответствии с нормативными документами*; рекомендуемая поверхностная плотность материала — не менее 180 г/м²; диапазон рабочих температур от минус 30,0 до 30,0 °С, при этом материал не должен деформироваться, расслаиваться и изменять свои физические свойства
Теплоизолирующий	Сохранение температуры продукции	В соответствии с нормативными документами*; рекомендуемая поверхностная плотность материала — не менее 350 г/м²; гидрофобный

Примечание. Нормативные документы* перечислены по ссылке¹.

Note. The regulatory documents* are listed at the link.

Экспериментальная модель паллеты с пищевой продукцией (Рисунок 2) включала:

- (1) имитаторы продукции — вареная гречневая крупа, подобранная по объему и теплофизическим свойствам, эквивалентным характеристикам стандартной паллеты, полностью загруженной готовой охлажденной пищевой продукцией;

Рисунок 2

Экспериментальная модель паллеты с пищевой продукцией

Figure 2

Experimental Pallet Model Loaded with Food Products

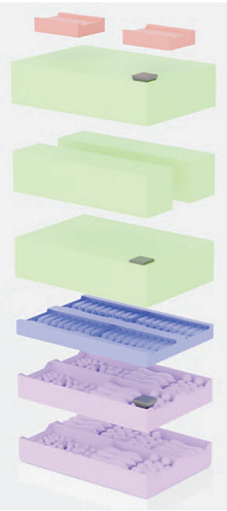


Схема паллеты



Общий вид паллеты

- (2) реальные продукты — охлажденные кулинарные изделия из мяса птицы (салат «Оливье», фасовка 200 г, 7 шт.), размещенные в зонах установки датчиков температуры для ее контроля и регистрации.

Данный подход обеспечил соответствие экспериментальной модели реальным условиям логистики скоропортящихся пищевых продуктов.

Процедура исследования

Измерение теплофизических характеристик

Метод измерения плотности теплового потока заключался в закреплении термочехлов на переносной холодильный ларь для создания разницы температур (ΔT , К) на внутренней (T_1 , К) и внешней (T_2 , К) поверхностях термочехла. На внутренней поверхности с помощью термопасты КПТ8 закрепляли термометр сопротивления (датчик температуры) и один из датчиков теплово-

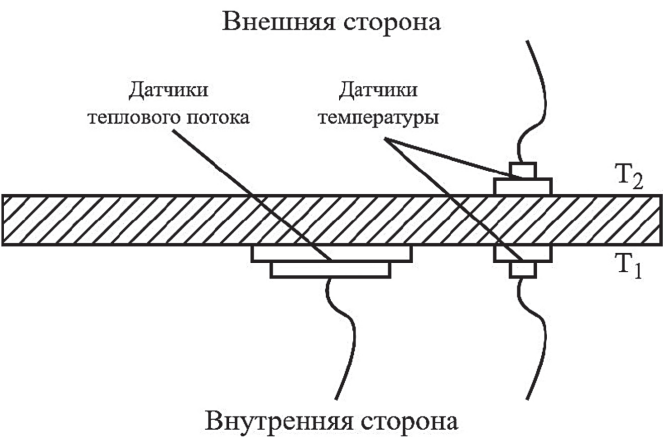
¹ Федеральный закон от 30.03.99 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»;
Федеральный закон от 02.01.2000 № 29-ФЗ «О качестве и безопасности пищевых продуктов»;
СанПиН 2.3.5.021–94 «Санитарные правила для предприятий продовольственной торговли»;
Инструкция по санитарной обработке специализированного подвижного состава и контейнеров, занятых на перевозке пищевых продуктов, утвержденная заместителем министра здравоохранения РСФСР 3 мая 1978 г.;
Инструкция по дезинфекции санитарного автотранспорта при различных температурных условиях № 835-70 от 06.01.70, утвержденная начальником Главного санитарно-эпидемиологического управления Министерства здравоохранения СССР.

Рисунок 3

Расположение датчиков на полотне термочехла

Figure 3

Placement of Sensors on the Thermal Cover Fabric



го потока. Аналогично датчик температуры закрепляли снаружи таким образом, чтобы внешний датчик располагался напротив внутреннего (Рисунок 3).

Обеспечивали разность температур наружной и внутренней поверхностей термочехла на уровне 15,0; 20,0 и 25,0 °С. Каждый режим выдерживали до достижения установившейся температуры, подтвержденной показаниями датчиков в течение не менее 30 мин.

Расчет коэффициента теплопередачи

После анализа результатов исследования теплового потока рассчитывали коэффициент теплопередачи для каждого термочехла.

Исследование продолжительности хранения

Исследование выполняли в теплоизолированной камере при имитации кратковременных изменений температурного режима, соответствующих погрузочно-разгрузочным операциям:

- (1) предварительное охлаждение паллеты с продукцией до температуры от 1,0 до 3,0 °С;
- (2) установка паллеты в теплоизолированной камере и размещение датчиков температуры в зоне реальных пищевых образцов;
- (3) накрытие паллеты исследуемым термочехлом с плотным прилеганием;
- (4) кратковременная стабилизация (≤ 5 мин) для установления условий;

- (5) включение тепловентиляторов, моделирующих внешнюю температуру 30,0 °С;
- (6) непрерывная регистрация температуры продукта в течение 12 ч;
- (7) продолжительность хранения, за которую температура в контрольной точке продукта достигала критического порогового значения (7,0 °С), определяли на основе анализа зарегистрированных термограмм.

Каждый из образцов термочехлов проходил три повторных испытания, что обеспечило статистическую надежность полученных данных.

Оборудование

Для создания разницы температур при определении плотности теплового потока использовали переносной холодильный ларь Meyvel AF-H120 («Meyvel», Китай).

Плотность теплового потока определяли с помощью измерителя плотности теплового потока ИТП-МГ4.03 «Поток» (ООО «СКБ Стройприбор», Россия), основные технические характеристики которого представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики ИТП-МГ4.03 «Поток»

Table 2

Main Technical Specifications of the Flow Density Heat Flux and Temperature Meter 4.03 Potok

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений: – плотности теплового потока, Вт/м ² – температуры, °С	От 10 до 999 От минус 30 до 100
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения плотности теплового потока, %	±6,0
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения температуры, °С, в диапазоне: – от минус 30 до 80 °С – от 80 до 100 °С	±0,2 ±0,5
Пределы допускаемой дополнительной погрешности измерения плотности теплового потока, вызванной отклонением температуры датчиков теплового потока от 20 °С (на каждые 10 °С отклонения), %	±0,5
Пределы допускаемой дополнительной погрешности измерения температуры, вызванной отклонением температуры электронного блока от 20 °С (на каждые 10 °С отклонения), °С	±0,05

В.В. Никитин, А.Н. Сучков, Р.Б. Савицкий, И.Т. Онацкий

Контроль и регистрацию температуры охлажденной продукции и окружающей среды (воздух) производили с помощью двух 12-канальных электронных измерителей-регистраторов «Термодат-25М5» (ООО НПП «Системы контроля», Россия) с программным обеспечением TermodatNet (частота опроса — 1 раз/мин) с преобразователями термоэлектрическими ТПК011 (ООО «КИПСервис», Россия) в количестве 24 шт., основные технические характеристики которых представлены в Таблицах 3 и 4 соответственно.

Таблица 3

Основные технические характеристики измерителя-регистратора температуры «Термодат-25М5»

Table 3

Main Technical Specifications of the Temperature Controller Thermodat 25m5

Диапазон измерения, °C	От минус 270 до 2500
Измерительные универсальные входы, шт.	До 12
Класс точности	0,25
Разрешающая способность при измерении температуры, °C	0,1
Компенсация температуры холодного спая	Автоматическая
Регистрация в Государственном реестре средств измерений РФ	№ 17602-09

Таблица 4

Основные технические характеристики преобразователей термоэлектрических ТПК011

Table 4

Main Technical Specifications of TPK011 Thermoelectric Converters

Тип термопары	Хромель-алюмель
Диапазон измеряемых температур, °C	От минус 40 до 800
Показатель тепловой инерции, с, не более	3
Диаметр термоэлектрода, мм	0,5

Для нагрева воздуха в теплоизолированной камере применяли тепловентиляторы Ballu BFH/S-04 («Ballu», Китай).

Методы

Теплоизоляционные свойства термочехлов оценивали по коэффициенту теплопередачи (Ткаченко, 2017), рассчитанному на основе экспериментально измеренной

плотности теплового потока и разности температур внутренней и внешней поверхностей термочехла:

$$k = \frac{q}{\Delta T},$$

где k — коэффициент теплопередачи (Вт/(м²·К));

q — плотность теплового потока (Вт/м²);

ΔT — разность температур внутренней и внешней поверхностей термочехлов (К).

Температурный мониторинг проводили с использованием термограмм, отражающих динамику изменения температуры продукта под термочехлом, для оценки его способности поддерживать безопасную температуру продукции при внешних тепловых нагрузках.

Анализ данных

Обработку и анализ экспериментальных данных проводили в программном обеспечении Microsoft Excel 2024:

- (1) усреднение результатов трех повторных измерений для каждого типа термочехла;
- (2) расчет среднего значения и стандартного отклонения для коэффициента теплопередачи;
- (3) визуализация вариативности данных с помощью диаграмм с линиями погрешностей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для достижения поставленной цели исследования получены экспериментальные данные по теплофизическим характеристикам шести типов термочехлов и оценена их эффективность в условиях имитации погрузочно-разгрузочных операций.

Теплофизические характеристики термочехлов при стационарном тепловом потоке

В ходе экспериментов определена плотность теплового потока через шесть образцов трехслойных термочехлов при фиксированных перепадах температур: 15,0; 20,0 и 25,0 °C. Измерения выполнены в трехкратной повторности. Полученные значения представлены в Таблице 5.

На основе полученных данных о плотности теплового потока при трех перепадах температур рассчита-

В.В. Никитин, А.Н. Сучков, Р.Б. Савицкий, И.Т. Онацкий

Таблица 5

Плотность теплового потока через термочехлы
при различных температурных перепадах

Table 5

Heat Flux Density through Thermal Covers under Various
Temperature Differentials

Термочехол	Плотность теплового потока q , Вт/м ² , при перепаде температур ΔT , °C		
	15,0	20,0	25,0
№ 1	12,7 ± 0,6	15,3 ± 0,6	17,7 ± 0,6
№ 2	11,3 ± 0,6	14,3 ± 1,2	16,7 ± 0,6
№ 3	17,7 ± 0,6	20,7 ± 0,6	26,7 ± 1,2
№ 4	13,7 ± 0,6	18,3 ± 0,6	23,3 ± 0,6
№ 5	14,7 ± 0,6	18,3 ± 0,6	21,3 ± 0,6
№ 6	10,3 ± 0,6	12,7 ± 0,6	14,3 ± 0,6

ны средние значения коэффициента теплопередачи для каждого термочехла. Результаты представлены на Рисунке 4.

Динамика температуры пищевого продукта при имитации погрузочно-разгрузочных операций

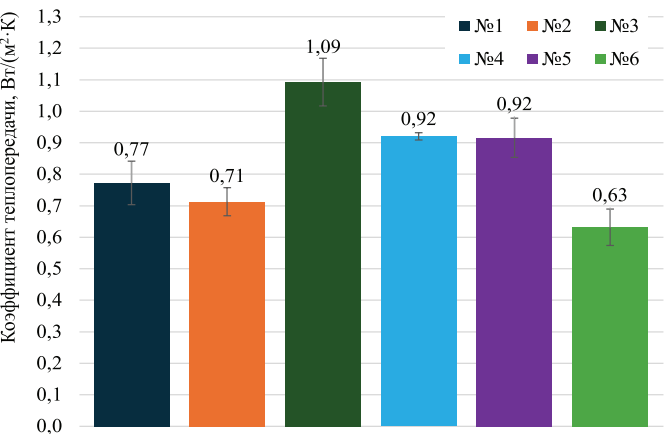
Перед основным этапом испытаний было проведено предварительное исследование на термочехле № 2,

Рисунок 4

Средние значения коэффициента теплопередачи
различных типов термочехлов

Figure 4

Average Values of the Heat Transfer Coefficient for Different
Types of Thermal Covers



в ходе которого регистрировалась температура реальных пищевых продуктов (салата «Оливье») одновременно в трех зонах паллеты: нижней, средней и верхней при температуре окружающей среды 30,0 °C.

Анализ термограмм (Рисунок 5) показал, что критическая температура продукции (7,0 °C) достигается значительно быстрее в верхней части паллеты, что обусловлено влиянием естественной конвекции, при которой теплый воздух скапливается у верхних слоев паллеты,

Рисунок 5

Термограммы образцов продукта в нижней, средней и верхней зонах
паллеты с применением термочехла № 2

Figure 5

Thermograms of Product Samples in the Lower, Middle, and Upper Zones
of the Pallet Covered with Thermal Cover № 2

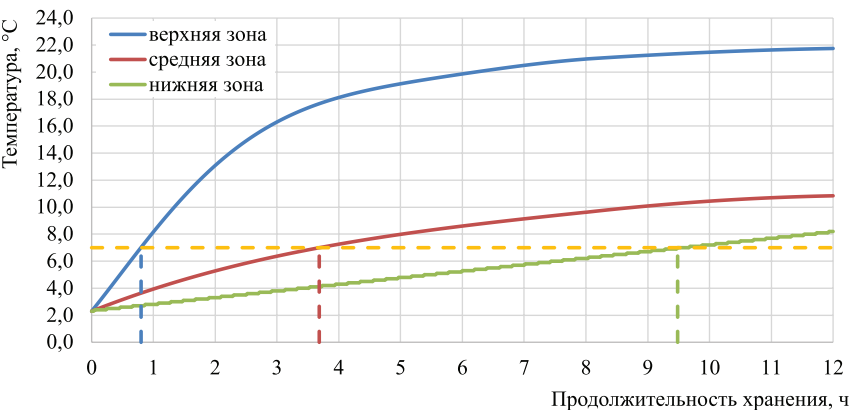
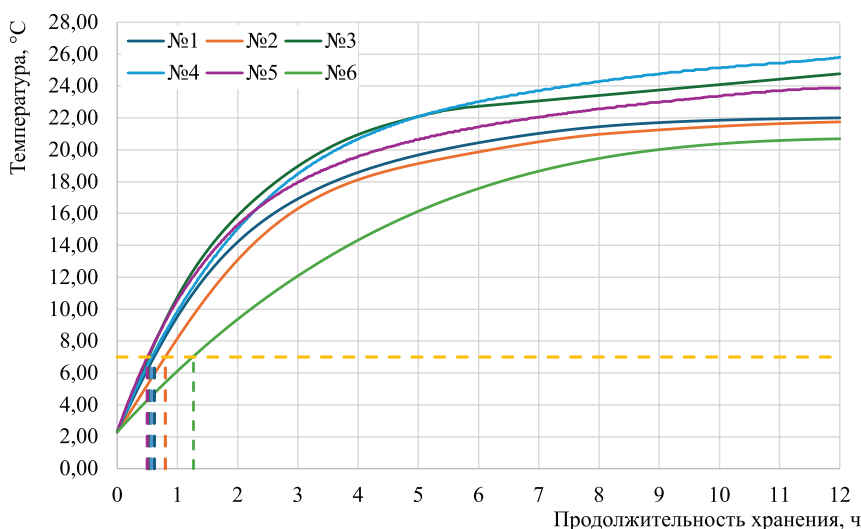


Рисунок 6

Термограммы образцов продукта в верхней зоне паллеты

Figure 6

Thermograms of Product Samples in the Upper Zone of the Pallet



а также повышенной радиационной и конвективной нагрузкой на эту зону со стороны окружающей среды. Исходя из этого, для обеспечения надежной и показательной оценки эффективности термочехлов в последующих испытаниях контрольные измерения температуры проводились исключительно на продуктах, расположенных в верхней части паллеты.

На следующем этапе исследования проведена оценка эффективности термочехлов при хранении пищевой продукции в условиях, имитирующих погрузочно-разгрузочные операции. В ходе эксперимента регистрировалась продолжительность хранения, за которую температура в контрольной точке продукта повышалась от начального уровня (от 1,0 до 3,0 °С) до критического порогового значения (7,0 °С) при температуре окружающей среды 30,0 °С в течение 12 ч. Результаты представлены в виде термограмм, отражающих изменение температуры продукта в верхней (Рисунок 6) зоне паллеты.

В результате полученных данных установлены зависимости между теплоизоляционными свойствами термочехлов и продолжительностью сохранения безопасной температуры пищевой продукции при имитации кратковременных нарушений температурного режима (Рисунок 7).

Для оценки потенциала повышения эффективности термозащиты была проведена дополнительная серия экспериментов с использованием наихудшего по изо-

Рисунок 7

Зависимость продолжительности сохранения безопасной температуры пищевой продукции при имитации кратковременных нарушений температурного режима от теплоизоляционных свойств термочехлов

Figure 7

Dependence of the Duration of Safe Temperature Retention in Food Products under Simulated Short-Term Temperature Disruptions on the Thermal Insulation Properties of Thermal Covers

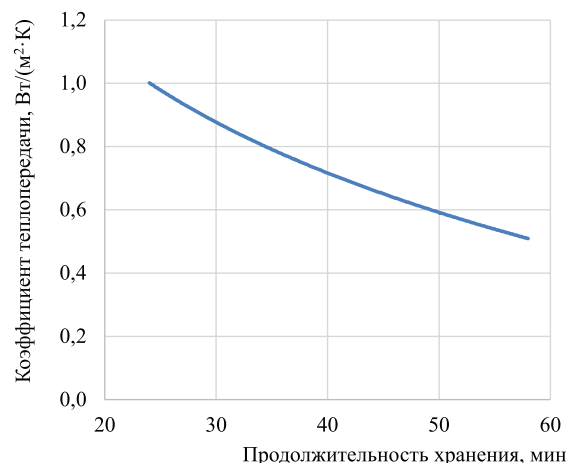
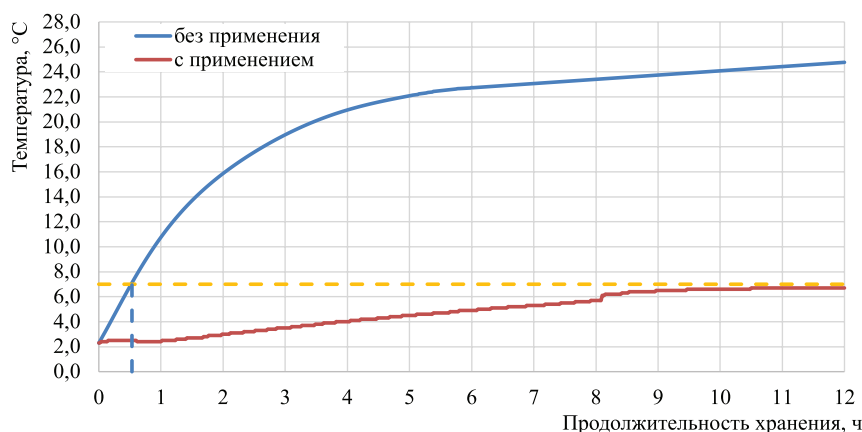


Рисунок 8

Термограммы образцов продукта в верхней зоне паллеты под термочехлом № 3 с применением аккумуляторов холода и без него

Figure 8

Thermograms of Product Samples in the Upper Zone of the Pallet under Thermal Cover № 3, with and without the Use of Phase-Change Cold Packs (Coolant Packs)



ляционными свойствам термочехла № 3 в комбинации с тремя аккумуляторами холода, предварительно охлажденными до температуры минус 18,0°C. Аккумуляторы размещали в верхней зоне паллеты — области, где, как было установлено ранее, продукт быстрее всего достигает критической температуры. В ходе испытаний при тех же условиях (внешняя температура 30,0°C, продолжительность 12 ч) температура продукта в верхней части паллеты не превысила 7,0°C, что демонстрирует высокую эффективность данного подхода к термозащите (Рисунок 8).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные данные подтверждают ключевую роль теплофизических характеристик термочехлов в формировании термостабильности скоропортящейся пищевой продукции при кратковременных нарушениях температурного режима, характерных для погрузочно-разгрузочных операций. Разница в коэффициенте теплопередачи (k) в 0,46 Вт/(м² · К) (с 0,63 до 1,09) привела к сокращению продолжительности сохранения безопасной температуры ($\leq 7,0^\circ\text{C}$) более чем в два раза (с 58 до 28 мин). Незначительное увеличение k вызывает ускоренное накопление тепловой энергии и, как следствие, быстрый выход температуры продукции за критический порог. Установленная зависимость

между коэффициентом теплопередачи и продолжительностью сохранения безопасной температуры позволяет рассматривать данные параметры как количественно обоснованный критерий выбора пассивных средств термозащиты в холодильной цепи.

Критическая роль верхней зоны паллеты обусловлена совокупностью факторов конвективного и радиационного теплообмена. Во-первых, в условиях имитации погрузочно-разгрузочных работ и промежуточного хранения (температура окружающей среды 30,0°C) теплый воздух, имеющий меньшую плотность, стремится вверх, создавая зону повышенной тепловой нагрузки в верхней части грузового пространства. Во-вторых, верхняя поверхность паллеты имеет максимальную площадь контакта с этим нагретым воздушным слоем. Таким образом, наиболее уязвимой является именно верхняя зона системы термозащиты, и ее мониторинг обеспечивает наиболее надежную оценку эффективности термочехла.

Настоящее исследование вносит конкретный вклад в развитие теории и практики холодильной цепи, дополняя и уточняя ранее полученные результаты. Работы Hoang (2011) и Ndraha (2018) качественно описывают риски температурных нарушений, а исследования Kornienko (2020) и Abbas (2023) подтверждают общую тенденцию — снижение k увеличивает срок безопас-

ного хранения. Однако настоящая работа впервые предоставляет экспериментально верифицированную количественную связь между базовым теплофизическим параметром k и ключевым операционным показателем (продолжительностью сохранения температуры продукции) в условиях уязвимого и динамичного участка цепи поставок. Кроме того, эмпирически доказано влияние зонирования паллеты на эффективность термозащиты, что позволяет перейти от усредненной оценки к точечному контролю.

Практическая ценность результатов носит прикладной характер:

- для логистических операторов данные позволяют рассчитывать допустимую продолжительность погрузочно-разгрузочных работ и выбирать термочехлы, гарантирующие соблюдение температурного режима на конкретном маршруте;
- для производителей упаковки работа задает четкий технический критерий (целевой диапазон k) для разработки новых, более эффективных материалов;
- для ритейлеров и производителей пищевой продукции результаты дают возможность принимать обоснованные управленческие решения при выборе поставщиков логистических услуг и упаковочных решений, напрямую влияя на качество, безопасность продукции и минимизацию экономических потерь.

Выявленная эффективность комбинированного применения термочехлов и аккумуляторов холода указывает на перспективность гибридных систем термозащиты как инструмента повышения устойчивости холодильной цепи на уязвимых этапах логистики. Данный подход может быть использован при проектировании технологических регламентов транспортирования и временного хранения скоропортящейся продукции.

Полученные результаты формируют основу для дальнейших исследований, направленных на моделирование нестационарных тепловых процессов в условиях реальной логистической среды, а также на разработку прогнозных цифровых моделей оценки остаточного ресурса температурной устойчивости продукции. Эти направления представляются особенно значимыми в контексте цифровизации холодильной логистики и внедрения интеллектуальных систем мониторинга.

Тем самым проведенное исследование логически приводит к необходимости практической реализации по-

лученных выводов, что обуславливает содержание последующего раздела, посвященного формированию итоговых выводов и рекомендаций.

Ограничения

Испытания проводились при фиксированной внешней температуре (30,0° C) без учета таких факторов реальной логистической среды, как солнечная радиация, ветровая нагрузка и колебания температуры. Эти факторы, как правило, усиливают теплопередачу, что может привести к занижению реальной продолжительности сохранения безопасной температуры продукции.

Также следует отметить, что эксперимент проводился при условии плотной укладки продукции, минимизирующей межпродуктовые воздушные полости. В реальных логистических условиях при укладке зачастую образуются зазоры, что приводит к формированию внутренних конвективных потоков воздуха в объеме паллеты. Данные потоки интенсифицируют процесс переноса тепла от наружной поверхности термочехла к поверхности продукции.

Таким образом, полученные данные отражают наиболее благоприятный (контролируемый) сценарий. В реальных условиях эффективность термочехлов может быть как ниже, так и выше, в зависимости от совокупного влияния микроклимата и конструктивных особенностей груза, что подчеркивает необходимость проведения дополнительных полевых исследований для верификации лабораторных данных и разработки корректирующих коэффициентов для практического применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящего исследования экспериментально подтверждена определяющая роль теплофизических характеристик термочехлов в обеспечении температурной устойчивости скоропортящейся пищевой продукции при кратковременных нарушениях температурного режима, характерных для погрузочно-разгрузочных операций. Установленная количественная зависимость между коэффициентом теплопередачи и продолжительностью сохранения безопасной температуры позволяет рассматривать данный показатель как объективный критерий оценки эффективности пассивных средств термозащиты в холодильной цепи.

Экспериментально показано, что комбинированное применение термочехлов и аккумуляторов холода обеспечивает принципиально более высокий уровень термостабильности продукции по сравнению с использованием только пассивной термоизоляции, что открывает возможности для проектирования гибридных систем термозащиты в логистике скоропортящихся продуктов.

Практическая значимость работы заключается в возможности прогнозирования эффективности термочехлов на этапе лабораторных испытаний по их базовым теплофизическим характеристикам, что может быть использовано логистическими операторами, производителями упаковочных материалов и предприятиями розничной торговли при выборе решений для обеспечения устойчивости холодильной цепи.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением экспериментальных условий, моделированием нестационарных климатических воздействий и интеграцией термочехлов с цифровыми системами мониторинга, что позволит перейти от статической оценки термозащиты к динамическому прогнозированию остаточного температурного ресурса продукции в реальном времени.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Никитин Владимир Владиславович: администрирование проекта, администрирование данных, концептуализация, создание рукописи и её редактирование.

Сучков Александр Николаевич: руководство исследованием, методология, ресурсы создание рукописи и её редактирование.

Савицкий Роман Борисович: формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи.

Онацкий Илья Тимурович: верификация данных, проведение исследования, визуализация.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Nikitin Vladimir Vladislavovich: project administration, data curation, conceptualization, writing—original draft, and writing—review & editing.

Suchkov Aleksandr Nikolaevich: supervision, methodology, resources, writing—original draft, and writing—review & editing.

Savitskiy Roman Borisovich: formal analysis, investigation, writing—original draft.

Onatskiy Ilya Timurovich: data validation, investigation, visualization.

ЛИТЕРАТУРА

- Андреев, С. П. (2016). Холодильная цепь — основа обеспечения качества и конкурентоспособности российской пищевой продукции. *Холодильная техника*, (7), 48–52. <https://doi.org/10.17816/RF99121>
- Бараненко, А. В., & Белозеров, Г. А. (2010). Непрерывная холодильная цепь — основа стратегии ресурсосбережения и обеспечения качества продовольствия. *Холодильная техника*, (3), 9–12. <https://doi.org/10.17816/RF97771>
- Белозеров, Г. А., & Большаков, О. В. (2007). Системный анализ непрерывной холодильной цепи. *Пищевая промышленность*, (4), 40–42.
- Белозеров, Г. А. (2012). Непрерывная холодильная цепь. *Мясные технологии*, (5), 47–49.
- Большаков, О. В. (1998). *Научное и инженерное обеспечение мясной промышленности*. Пищепромиздат
- Ворон, О. А., & Морчиладзе, И. Г. (2014). Аспекты совершенствования железнодорожных перевозок скоропортящихся грузов в составе непрерывной холодильной цепи. Транспорт Российской Федерации. *Журнал о науке, практике, экономике*, (1), 40–45
- Корниенко, В. Н., Грызунов, А. А., & Авилова, С. В. (2018). Поддержание температурных режимов при внутригородских перевозках охлажденной мясной продукции. *Все о мясе*, (4), 56–60.
- Корниенко, В. Н., Петров, В. В., & Горбунова, Н. А. (2021). Контроль температурных режимов в непрерывной холодильной цепи оборота мяса и мясной продукции. *Все о мясе*, (5), 54–60. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2021-5-54-60>

- Настасиевич, И., Лакицевич, Б., & Петрович, З. (2017). Управление холодильной цепью при поставках мяса: «старые» и новые стратегии. *Теория и практика переработки мяса*, 2(4), 20–34. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2017-2-4-20-34>
- Никитин, В. В., & Сучков, А. Н. (2025). Динамика сохранности свежего перца в условиях, имитирующих холодильную цепь. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(2), 57–75. <https://doi.org/10.36107/spfr.2025.2.640>
- Румянцева, О. Н. (2009). Оценка влияния параметров холодильной цепи на сохранение качества, экологической безопасности и рациональность использования пищевых продуктов. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*, (1), 37–44.
- Тертеров, М. Н. (1981). Проблемы развития непрерывной холодильной цепи. *Холодильная техника*, (10), 13–17.
- Ткаченко, Л. А., & Репина, А. В. (2017). *Теория теплообмена* (Н. Ф. Кашапов, Ред.). Казань: Издательство Казанского университета.
- Тяпухин, А. П. (2018). *Логистика. Управление цепями поставок*. КНОРУС
- Тяпухин, А. П. (2020). *Логистика*. Юрайт.
- Тяпухин, А. П., Коловертнова, М. Ю., & Гусева, Е. П. (2021). Сущность и содержание логистического подхода к снижению продовольственных потерь. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление*, (2), 85–98. <https://doi.org/10.17308/econ.2021.2/3382>
- Щачек, Т. М., Зеленкова, Е. Н., Травкина, С. Г., Пенкрат, А. С., & Мешкова, А. С. (2023). Планирование эксперимента при оценке сроков годности пищевой продукции. Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология, 265(1), 5–14. <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2023-265-1-1>
- Abbas, H., Zhao, L., Gong, X., & Faiz, N. (2023). The perishable products case to achieve sustainable food quality and safety goals implementing on-field sustainable supply chain model. *Socio-Economic Planning Sciences*, 87, Article 101562. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101562>
- Ali, I., Nagalingam, S., & Gurd, B. (2018). A resilience model for cold chain logistics of perishable products. *The International Journal of Logistics Management*, 29(3), 922–941. <https://doi.org/10.1108/IJLM-09-2017-0230>
- Bai, Y., Wu, H., Huang, M., Luo, J., & Yang, Z. (2023). How to build a cold chain supply chain system for fresh agricultural products through blockchain technology — A study of tripartite evolutionary game theory based on prospect theory. *PLOS ONE*, 18(11), Article e0294520. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294520>
- Bal, M., & Pawlicka, K. (2021). Supply chain finance and challenges of modern supply chains. *LogForum*, 17(1), 71–82. <https://doi.org/10.17270/J.LOG.2021.525>
- Dai, J., Che, W., Lim, J. J., & Shou, Y. (2020). Service innovation of cold chain logistics service providers: A multiple-case study in China. *Industrial Marketing Management*, 89, 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.05.013>
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/3/mb060e/mb060e00.htm>
- Han, J. W., Zuo, M., Zhu, W. Y., Zuo, J. H., Lü, E. L., & Yang, X. T. (2021). A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products: Current status, challenges, and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 536–551. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.039>
- Hoang, H. M., Flick, D., Alvarez, G., & Laguerre, O. (2011). Evaluation of food safety along the cold chain by deterministic and stochastic approaches. In *Proceedings of the 23rd IIR International Congress of Refrigeration (ICR 2011)*. Prague, Czech Republic. HAL CCSD.
- Kornienko, V. N., Gryzunov, A. A., Nikolaev, N. S., Motin, V. V., & Kazakova, N. V. (2020). Heat and mass exchanging processes in a refrigerated truck body during multi-drop urban distribution of fresh herbs. *Revista San Gregorio*, 1(37), 61–74. <https://doi.org/10.36097/rsan.v1i37.1251>
- Latha, D. S., & Samanchuen, T. (2023). Development of reference process model and reference architecture for pharmaceutical cold chain. *Sustainability*, 15(5), Article 3935. <https://doi.org/10.3390/su15053935>
- Lei, Y., Zhang, Y., Cheng, Y., Huang, J., & Huang, M. (2023). Monitoring and identification of spoilage-related microorganisms in braised chicken with modified atmosphere packaging during refrigerated storage. *Food Science and Human Wellness*, 12(1), 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.07.015>

- Li, F., Ai, W., & Ju, T. (2022). Cold chain logistics distribution path planning of fresh products in Beijing subcenter. *Sustainability*, 14(17), Article 10622. <https://doi.org/10.3390/su141710622>
- Lu, L., Hu, S., Ren, Y., Kang, K., & Li, B. (2022). Research on extension design of emergency cold chain logistics from the perspective of carbon constraints. *Sustainability*, 14(15), Article 9083. <https://doi.org/10.3390/su14159083>
- Ndraha, N., Hsiao, H. I., Vljajic, J., Yang, M. F., & Lin, H. T. V. (2018). Time-temperature abuse in the food cold chain: Review of issues, challenges, and recommendations. *Food Control*, 89, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.01.027>
- Nychas, G. J. E., Skandamis, P. N., Tassou, C. C., & Koutsoumanis, K. P. (2008). Meat spoilage during distribution. *Meat Science*, 78(1–2), 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.06.020>
- Onwude, D., Motmans, T., Shoji, K., Evangelista, R., Gajardo, J., Odion, D., ... & Defraeye, T. (2023). Bottlenecks in Nigeria's fresh food supply chain: What is the way forward? *Trends in Food Science & Technology*, 137, 55–62. <https://doi.org/10.31224/2447>
- Parfitt, J., Barthel, M., & Macnaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 3065–3081. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126>
- Raab, V., Petersen, B., & Kreyenschmidt, J. (2011). Temperature monitoring in meat supply chains. *British Food Journal*, 113(9), 1267–1289. <https://doi.org/10.1108/000707011111177683>
- Ren, T., Ren, J., Matellini, D. B., & Ouyang, W. (2022). A comprehensive review of modern cold chain shipping solutions. *Sustainability*, 14(22), Article 14746. <https://doi.org/10.3390/su142214746>
- Rodriguez, A., & Sanders, I. R. (2016). Colombian-Swiss research to help feed the planet: From Green Revolution to Microbial Revolution. *Acta Biológica Colombiana*, 21(1), 297–303. <https://doi.org/10.15446/ABC.V21N1SUP.50856>
- Stuart, T. (2009). *Waste: Uncovering the global food scandal*. Penguin Books
- Tan, S., & Zhang, X. (2025). Preparation of organic ternary phase change materials for fruit and vegetable cold chain logistics. *Journal of Energy Storage*, 108, Article 115067. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115067>
- Wang, L., Liu, G., & Ahmad, I. (2024). Cost optimization model design of fresh food cold chain system in the context of big data. *Big Data Research*, 35, Article 100417. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2024.100417>
- Wang, J., Zhang, X., Wang, X., Huang, H., Hu, J., & Lin, W. (2022). A data-driven packaging efficiency optimization method for a low carbon system in agri-products cold chain. *Sustainability*, 14(2), Article 858. <https://doi.org/10.3390/su14020858>
- Yan, H., Song, M. J., & Lee, H. Y. (2021). A systematic review of factors affecting food loss and waste and sustainable mitigation strategies: A logistics service providers' perspective. *Sustainability*, 13(20), Article 11374. <https://doi.org/10.3390/su132011374>
- Yang, S., Xiao, Y., Zheng, Y., & Liu, Y. (2017). The green supply chain design and marketing strategy for perishable food based on temperature control. *Sustainability*, 9(9), Article 1511. <https://doi.org/10.3390/app15020770>
- Zhang, H., Qiu, B., & Zhang, K. (2017). A new risk assessment model for agricultural products cold chain logistics. *Industrial Management & Data Systems*, 117(9), 1800–1816. <https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2017-0025>
- Zhang, Y., Ye, C., & Geng, X. (2022). A hesitant fuzzy method for evaluating risky cold chain suppliers based on an improved TODIM. *Sustainability*, 14(16), Article 10152. <https://doi.org/10.3390/su141610152>
- Zhao, F., Wei, Z., Zhou, G., Kristiansen, K., & Wang, C. (2022). Effects of different storage temperatures on bacterial communities and functional potential in pork meat. *Foods*, 11(15), Article 2307. <https://doi.org/10.3390/foods11152307>
- Zheng, C., Sun, K., Gu, Y., Shen, J., & Du, M. (2022). Multimodal transport path selection of cold chain logistics based on improved particle swarm optimization algorithm. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, Article 5458760. <https://doi.org/10.1155/2022/5458760>

REFERENCES

- Andreev, S. P. (2016). Cold chain — the foundation for ensuring quality and competitiveness of Russian food products. *Refrigeration Engineering*, (7), 48–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/RF99121>
- Baranenkov, A. V., & Belozarov, G. A. (2010). Continuous cold chain — the foundation of a resource-saving strategy and food quality assurance. *Refrigeration Engineering*, (3), 9–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/RF97771>
- Belozarov, G. A., & Bol'shakov, O. V. (2007). System analysis of the continuous cold chain. *Food Industry*, (4), 40–42. (In Russ.)
- Belozarov, G. A. (2012). Continuous cold chain. *Meat Technologies*, (5), 47–49. (In Russ.)
- Bol'shakov, O. V. (1998). *Scientific and engineering support of the meat industry*. Food Industry Publishing House. (In Russ.)
- Voron, O. A., & Morchiladze, I. G. (2014). Aspects of improving railway transportation of perishable goods within a continuous cold chain. *Transport of the Russian Federation. Journal on Science, Practice, and Economics*, (1), 40–45. (In Russ.)
- Kornienko, V. N., Gryzunov, A. A., & Avilova, S. V. (2018). Maintenance of temperature regimes during the intracity transportation of the chilled meat products. *Vsyo o myase*, (4), 56–60. (In Russ.)
- Kornienko, V. N., Petrov V. V., & Gorbunova N. A. (2021). Control of temperature regimes in the continuous cold chain of meat and meat product turnover. *Vsyo o myase*, (5), 54–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2021-5-54-60>
- Nastasijevic I., Lakicevic B., Petrovic Z. (2017). Cold chain management in meat supply: «old» and novel strategies. *Theory and Practice of Meat Processing*, 2(4), 20–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2017-2-4-20-34>
- Nikitin, V. V., & Suchkov, A. N. (2025). Dynamics of fresh pepper preservation under conditions simulating the cold chain. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(2), 57–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.640>
- Rumyantseva, O. N. (2009). Assessment of the impact of cold chain parameters on quality preservation, environmental safety, and efficient use of food products. *Scientific Journal of ITMO University. Series "Economics and Environmental Management"*, (1), 37–44. (In Russ.)
- Terterov, M. N. (1981). Problems of developing a continuous cold chain. *Refrigeration Engineering*, (10), 13–17. (In Russ.)
- Tkachenko, L. A., & Repina, A. V. (2017). *Theory of heat transfer*. Kazan: Kazan University Press. (In Russ.)
- Tyapukhin, A. P. (2018). *Logistics. Supply Chain Management*. KNORUS. (In Russ.)
- Tyapukhin, A. P. (2020). *Logistics*. Yurayt. (In Russ.)
- Tyapukhin, A. P., Kolovertnova, M. Y., & Guseva, E. P. (2021). The essence and content of the logistics approach to reducing food losses. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Economics and Management*, (2), 85–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/econ.2021.2/3382>
- Shachek, T. M., Zelenkova, E. N., Travkina, S. G., Penkrat, A. S., & Meshkova, A. S. (2023). Experimental design in shelf-life assessment of food products. *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technologies, Biotechnology, Geocology*, 265(1), 5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2023-265-1-1>
- Abbas, H., Zhao, L., Gong, X., & Faiz, N. (2023). The perishable products case to achieve sustainable food quality and safety goals implementing on-field sustainable supply chain model. *Socio-Economic Planning Sciences*, 87, Article 101562. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101562>
- Ali, I., Nagalingam, S., & Gurd, B. (2018). A resilience model for cold chain logistics of perishable products. *The International Journal of Logistics Management*, 29(3), 922–941. <https://doi.org/10.1108/IJLM-09-2017-0230>

- Bai, Y., Wu, H., Huang, M., Luo, J., & Yang, Z. (2023). How to build a cold chain supply chain system for fresh agricultural products through blockchain technology—A study of tripartite evolutionary game theory based on prospect theory. *PLOS ONE*, 18(11), Article e0294520. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294520>
- Bal, M., & Pawlicka, K. (2021). Supply chain finance and challenges of modern supply chains. *LogForum*, 17(1), 71–82. <https://doi.org/10.17270/J.LOG.2021.525>
- Dai, J., Che, W., Lim, J. J., & Shou, Y. (2020). Service innovation of cold chain logistics service providers: A multiple-case study in China. *Industrial Marketing Management*, 89, 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.05.013>
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/mb060e/mb060e00.htm>
- Han, J. W., Zuo, M., Zhu, W. Y., Zuo, J. H., Lü, E. L., & Yang, X. T. (2021). A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products: Current status, challenges, and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 536–551. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.039>
- Hoang, H. M., Flick, D., Alvarez, G., & Laguerre, O. (2011). Evaluation of food safety along the cold chain by deterministic and stochastic approaches. In Proceedings of the 23rd IIR International Congress of Refrigeration (ICR 2011). Prague, Czech Republic. HAL CCSD.
- Kornienko, V. N., Gryzunov, A. A., Nikolaev, N. S., Motin, V. V., & Kazakova, N. V. (2020). Heat and mass exchanging processes in a refrigerated truck body during multi-drop urban distribution of fresh herbs. *Revista San Gregorio*, 1(37), 61–74. <https://doi.org/10.36097/rsan.v1i37.1251>
- Latha, D. S., & Samanchuen, T. (2023). Development of reference process model and reference architecture for pharmaceutical cold chain. *Sustainability*, 15(5), Article 3935. <https://doi.org/10.3390/su15053935>
- Lei, Y., Zhang, Y., Cheng, Y., Huang, J., & Huang, M. (2023). Monitoring and identification of spoilage-related microorganisms in braised chicken with modified atmosphere packaging during refrigerated storage. *Food Science and Human Wellness*, 12(1), 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.07.015>
- Li, F., Ai, W., & Ju, T. (2022). Cold chain logistics distribution path planning of fresh products in Beijing subcenter. *Sustainability*, 14(17), Article 10622. <https://doi.org/10.3390/su141710622>
- Lu, L., Hu, S., Ren, Y., Kang, K., & Li, B. (2022). Research on extension design of emergency cold chain logistics from the perspective of carbon constraints. *Sustainability*, 14(15), Article 9083. <https://doi.org/10.3390/su14159083>
- Ndraha, N., Hsiao, H. I., Vlajic, J., Yang, M. F., & Lin, H. T. V. (2018). Time-temperature abuse in the food cold chain: Review of issues, challenges, and recommendations. *Food Control*, 89, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.01.027>
- Nychas, G. J. E., Skandamis, P. N., Tassou, C. C., & Koutsoumanis, K. P. (2008). Meat spoilage during distribution. *Meat Science*, 78(1–2), 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.06.020>
- Onwude, D., Motmans, T., Shoji, K., Evangelista, R., Gajardo, J., Odion, D., ... & Defraeye, T. (2023). Bottlenecks in Nigeria's fresh food supply chain: What is the way forward? *Trends in Food Science & Technology*, 137, 55–62. <https://doi.org/10.31224/2447>
- Parfitt, J., Barthel, M., & Macnaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 3065–3081. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126>
- Raab, V., Petersen, B., & Kreyenschmidt, J. (2011). Temperature monitoring in meat supply chains. *British Food Journal*, 113(9), 1267–1289. <https://doi.org/10.1108/000707011111177683>
- Ren, T., Ren, J., Matellini, D. B., & Ouyang, W. (2022). A comprehensive review of modern cold chain shipping solutions. *Sustainability*, 14(22), Article 14746. <https://doi.org/10.3390/su142214746>
- Rodriguez, A., & Sanders, I. R. (2016). Colombian-Swiss research to help feed the planet: From Green Revolution to Microbial Revolution. *Acta Biológica Colombiana*, 21(1), 297–303. <https://doi.org/10.15446/ABC.V21N1SUP.50856>
- Stuart, T. (2009). *Waste: Uncovering the global food scandal*. Penguin Books

- Tan, S., & Zhang, X. (2025). Preparation of organic ternary phase change materials for fruit and vegetable cold chain logistics. *Journal of Energy Storage*, 108, Article 115067. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115067>
- Wang, L., Liu, G., & Ahmad, I. (2024). Cost optimization model design of fresh food cold chain system in the context of big data. *Big Data Research*, 35, Article 100417. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2024.100417>
- Wang, J., Zhang, X., Wang, X., Huang, H., Hu, J., & Lin, W. (2022). A data-driven packaging efficiency optimization method for a low carbon system in agri-products cold chain. *Sustainability*, 14(2), Article 858. <https://doi.org/10.3390/su14020858>
- Yan, H., Song, M. J., & Lee, H. Y. (2021). A systematic review of factors affecting food loss and waste and sustainable mitigation strategies: A logistics service providers' perspective. *Sustainability*, 13(20), Article 11374. <https://doi.org/10.3390/su132011374>
- Yang, S., Xiao, Y., Zheng, Y., & Liu, Y. (2017). The green supply chain design and marketing strategy for perishable food based on temperature control. *Sustainability*, 9(9), Article 1511. <https://doi.org/10.3390/app15020770>
- Zhang, H., Qiu, B., & Zhang, K. (2017). A new risk assessment model for agricultural products cold chain logistics. *Industrial Management & Data Systems*, 117(9), 1800–1816. <https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2017-0025>
- Zhang, Y., Ye, C., & Geng, X. (2022). A hesitant fuzzy method for evaluating risky cold chain suppliers based on an improved TODIM. *Sustainability*, 14(16), Article 10152. <https://doi.org/10.3390/su141610152>
- Zhao, F., Wei, Z., Zhou, G., Kristiansen, K., & Wang, C. (2022). Effects of different storage temperatures on bacterial communities and functional potential in pork meat. *Foods*, 11(15), Article 2307. <https://doi.org/10.3390/foods11152307>
- Zheng, C., Sun, K., Gu, Y., Shen, J., & Du, M. (2022). Multimodal transport path selection of cold chain logistics based on improved particle swarm optimization algorithm. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, Article 5458760. <https://doi.org/10.1155/2022/5458760>

ОБ АВТОРАХ

Никитин Владимир Владиславович, научный сотрудник ВНИХИ — филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН (127422, Российская Федерация, г. Москва, ул. Костякова д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1584-9483>, Scopus ID: 57205168834, Researcher ID: IST-1061-2023, SPIN-код: 5443-9232, v.nikitin@fncps.ru

Сучков Александр Николаевич, научный сотрудник ВНИХИ — филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН (127422, Российская Федерация, г. Москва, ул. Костякова д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7898-5124>, Scopus ID: 57211623755, Researcher ID: AAE-2184-2019, SPIN-код: 9510-3923, a.suchkov@fncps.ru

Савицкий Роман Борисович, инженер-исследователь ВНИХИ — филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН (127422, Российская Федерация, г. Москва, ул. Костякова д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4889-3472>, Researcher ID: OVZ-0463-2025, SPIN-код: 3705-3690, r.savickiy@fncps.ru

Онацкий Илья Тимурович, младший научный сотрудник ВНИХИ — филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН (127422, Российская Федерация, г. Москва, ул. Костякова д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6436-242X>, Researcher ID: IST-1038-2023, SPIN-код: 7761-7069, i.onatskiy@fncps.ru

ABOUT THE AUTHORS

Nikitin Vladimir Vladislavovich, Researcher at the Department of Refrigeration and Process Systems, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V.M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems (127422, Russian Federation, Moscow, Kostyakova street, 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1584-9483>, Scopus ID: 57205168834, Researcher ID: IST-1061-2023, SPIN-код: 5443-9232, v.nikitin@fncps.ru

Suchkov Alexander Nikolaevich, Researcher at the Department of Refrigeration and Process Systems, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V.M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems (127422, Russian Federation, Moscow, Kostyakova street, 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7898-5124>, Scopus ID: 57211623755, Researcher ID: AAE-2184-2019, SPIN-код: 9510-3923, a.suchkov@fncps.ru

Savitskiy Roman Borisovich, Research Engineer at the Department of Refrigeration and Process Systems, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V.M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems (127422, Russian Federation, Moscow, Kostyakova street, 12), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4889-3472>, Researcher ID: OVZ-0463-2025, SPIN-код: 3705-3690, r.savitskiy@fncps.ru

Onatskiy Ilya Timurovich, Researcher at the Department of Refrigeration and Process Systems, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V.M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems (127422, Russian Federation, Moscow, Kostyakova street, 12), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6436-242X>, Researcher ID: IST-1038-2023, SPIN-код: 7761-7069, i.onatskiy@fncps.ru

Динамика микробного сообщества кисломолочного напитка, приготовленного с использованием кефирных грибков

Д.Д. Коваль, В.А. Ратайчук, А.В. Хан, Е.Г. Лазарева, О.Ю. Фоменко

Всероссийский
научно-исследовательский
институт молочной
промышленности, г. Москва,
Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Несмотря на значительное количество исследований, посвященных микробному составу кефира, представления о динамике микробного сообщества в процессе ферментации остаются фрагментарными. Большинство исследований в этой области основано на 16S-rRNA-секвенировании или классических культуральных методах, которые ограничены по разрешающей способности.

Цель: Оценка динамики состава микробного сообщества кисломолочного напитка, приготовленного с использованием кефирных грибков, на протяжении всего процесса — от этапа активации кефирных грибков до образования продукта с истекшим сроком годности с целью выявления закономерностей перестройки микробного сообщества кефира с применением полногеномного метагеномного секвенирования, обеспечивающего таксономическую идентификацию микроорганизмов на уровне видов.

Материалы и методы: Исследование выполнено в лаборатории прикладной микробиологии и геномики микроорганизмов Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности (ФГАНУ «ВНИМИ»). Объектами исследования являлись лиофилизированные кефирные грибки и кефир, приготовленный на их основе. Отбор проб осуществляли на последовательных этапах: 0 ч — лиофилизированные грибки, 48 ч — метаболически активные грибки, 120 ч — кефирная закваска, 122 ч — внесение 5% закваски в молоко, 130 ч — окончание ферментации кефира при +20 °C, 138 ч — готовый кефир после созревания при +4 °C, и хранение при +4 °C в течение 7, 14 и 21 суток ($n = 10$). Из каждой пробы выделяли тотальную ДНК, на основе которой готовили библиотеки и проводили полногеномное метагеномное секвенирование на платформе GeneMind FASTASeq300 в режиме парно-концевого чтения (paired-end, 2x150 п. н.) при глубине секвенирования не менее 5 млн прочтений на временную точку с последующей фильтрацией прочтений и биоинформатическим анализом таксономической структуры микробного сообщества с идентификацией микроорганизмов до уровня вида применением Kraken2 и референсной базы данных PlusPF с последующей реклассификацией и оценкой представленности видов с использованием Bracken.

Результаты: Метагеномный анализ последовательных стадий активации кефирных грибков, ферментации и хранения кефира показал, что микроорганизмы из грибков последовательно заселяют жидкую фазу, где наблюдалась упорядоченная сукцессия: микробное сообщество кефирных грибков на ~80% представлено *Lactobacillus kefiranofaciens*, в то время как доминирующими видами в закваске и кефире являлись *L. cremoris*, *L. helveticus*, *L. lactis*. Дрожжевой компонент был представлен одним видом — *Kluyveromyces marxianus*, максимальная относительная представленность которого не превышала ~1,3 % на всех исследованных стадиях.

Выводы: Установлена динамика изменений микробного состава кисломолочного напитка, приготовленного с использованием кефирных грибков, на разных стадиях ферментации и хранения. Полученные данные подчеркивают важность дальнейших исследований динамики микробиома в производстве кефира для более глубокого понимания его влияния на качество и стабильность готового продукта. Результаты исследования могут быть полезны для разработки более эффективных методов управления составом микробных сообществ кисломолочных напитков, создания стандартизированных заквасок и прогнозирования стабильности качества ферментированных молочных продуктов.

Ключевые слова: кефирные грибки; молочный кефир; молочнокислая ферментация; полногеномное секвенирование; метагеномное секвенирование

Корреспонденция:

Дарья Дмитриевна Коваль
E-mail: d_koval@vniimi.org

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 12.09.2025

Принята: 15.12.2025

Опубликована: 30.12.2025

Copyright: © 2025 Авторы



Для цитирования: Коваль, Д.Д., Ратайчук, В.А., Лазарева, Е.Г., Хан А.В., & Фоменко, О.Ю. (2025). Динамика микробного сообщества кисломолочного напитка, приготовленного с использованием кефирных грибков. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 32-54. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.94>

The Dynamics of the Microbial Community of a Fermented Milk Beverage Produced Using Kefir Grains

Daria D. Koval, Viktor A. Rataichuk, Alexey V. Khan, Ekaterina G. Lazareva, Oleg Yu. Fomenko

All-Russian Dairy Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: Despite a significant amount of research devoted to microbial composition of kefir, our understanding of microbial community dynamics during fermentation remains fragmented. Most studies rely on 16S rRNA sequencing or traditional culture methods, which have limited resolution.

Purpose: To evaluate the dynamics of the microbial community composition of a fermented milk drink prepared using kefir grains throughout the entire technological process — from the activation stage of kefir grains to the formation of a product with an expired shelf life, using whole-genome metagenomic sequencing.

Materials and Methods: The study was conducted at the Laboratory of Applied Microbiology and Microbial Genomics, All-Russian Dairy Research Institute (VNIMI). The study objects were lyophilized kefir grains and kefir prepared from them, sampled at different stages of the fermentation process and subsequent storage. The objects of the study were lyophilized kefir grains and kefir prepared from them. Sampling was carried out at the following sequential stages: 0 h — lyophilized grains, 48 h — metabolically active grains, 120 h — kefir starter culture, 122 h — addition of 5% starter culture to milk, 130 h — end of kefir fermentation at +20 °C, 138 h — finished kefir after maturation at +4 °C, and storage at +4 °C for 7, 14, and 21 days ($n = 10$). Total DNA was isolated from each sample, which was used to prepare libraries and perform whole-genome metagenomic sequencing on the GeneMind FASTASeq300 platform in paired-end reading mode (2×150 bp) with a sequencing depth of at least 5 million reads per time point, followed by read filtering and bioinformatics analysis of the taxonomic structure of the microbial community with identification of microorganisms to the species level using Kraken2 and the PlusPF reference database, followed by reclassification and assessment of species representation using Bracken.

Results: Metagenomic analysis of the sequential stages of kefir grain activation, fermentation, and kefir storage revealed that microorganisms from the fungi sequentially colonize the liquid phase, where an ordered succession was observed: ~80% of the kefir grain microbial community was represented by *Lactobacillus kefirianofaciens*, while the dominant species in the starter culture and kefir were *L. cremoris*, *L. helveticus*, and *L. lactis*. The yeast component was represented by a single species, *Kluyveromyces marxianus*, whose maximum relative abundance did not exceed ~1.3% at all stages studied.

Conclusion: The dynamics of changes in the microbial composition of a fermented milk drink prepared using kefir grains were analyzed at different stages of fermentation and storage. The data obtained emphasizes the need for further research into the dynamics of the microbiome in kefir production to better understand its impact on the quality and stability of the final product. The results of the study may contribute to the development of more effective methods for managing the microbial community composition in fermented milk drinks, creating standardized starter cultures, and predicting the stability of fermented dairy product quality.

Keywords: kefir grains; milk kefir; lactic fermentation; whole-genome sequencing (WGS); metagenomic sequencing

Correspondence:

Daria D. Koval

E-mail: d_koval@vnimi.org

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 12.09.2025

Accepted: 15.12.2025

Published: 30.12.2025

Copyright: © 2025 The Authors



To cite: Koval, D.D., Rataychuk, V.A., Lazareva, E.G., Khan, A.V., & Fomenko, O.Yu. (2025). The Dynamics of the Microbial Community of a Fermented Milk Beverage Produced Using Kefir Grains. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 32-54. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.94>

ВВЕДЕНИЕ

Состав микробного сообщества кефира изучен достаточно широко: описано пространственное расположение дрожжей и бактерий в полисахаридной матрице кефирных зёрен (Marshall et al., 1984; Ding et al., 2022; Avila-Reyes et al., 2022), подтверждён их микробный состав (Dong et al., 2022; Baars et al., 2023; Walsh et al., 2023) и выявлены метаболиты, которые они синтезируют (Powell et al., 2007; Prado et al., 2015; Abdalla et al., 2021; Saleem et al., 2023; Encinas-Vazquez et al., 2023). Однако, временная динамика микробных сообществ на разных стадиях технологического процесса остаётся недостаточно изученной. Работы, посвящённые динамическим аспектам, ограничены методами с низкой разрешающей способностью. В исследовании Laureys & De Vuyst (2014), основанном на культуральных методах и PCR-DGGE, на всех временных точках выявлялся одинаковый набор доминирующих таксонов (*Lactobacillus*, *Acetobacter*, *Saccharomyces*, *Dekkera*), что было интерпретировано как отсутствие заметных изменений в структуре сообщества. Однако учитывая низкую чувствительность используемых методов к минорным и некультивируемым видам, подобная «стабильность», вероятно, отражает ограничения методики, а не реальную статичность сообщества.

В то же время исследование молочного кефира Kotova et al. (2016), в котором сочетались культуральный анализ, PCR-DGGE и микроскопия, показало наличие таксономического перераспределения при переходе от кефирных зёрен к напитку: доминирование *Lactobacillus spp.* в зёрнах сменялось преобладанием *Lactococcus/Leuconostoc spp.* в жидкой фракции. Однако характер сукцессионных процессов оставался недостаточно прояснён: таксономическая идентификация была преимущественно на уровне рода, а минорные и некультивируемые компоненты сообщества не всегда обнаруживались. Эти ограничения не позволили охарактеризовать полную структуру консорциума и оценить возможный вклад малочисленных таксонов, что подчёркивает необходимость методов с более высоким разрешением.

Несмотря на развитие технологий высокопроизводительного секвенирования, исследования, отслеживающие динамику микробиоты кефира с высоким таксономическим разрешением, остаются немногочисленными (McGovern et al., 2024; Blasche et al., 2021). Между тем, понимание экологической перестройки микробного

сообщества в процессе ферментации и хранения имеет не только теоретическое, но и практическое значение. Характер сукцессионных изменений определяет скорость подкисления, формирование сгустка, стабильность микробиоты при хранении, а также воспроизводимость органолептических и функциональных свойств готового продукта. Знание временной динамики доминирующих и минорных таксонов позволит обосновывать выбор технологических параметров ферментации, прогнозировать стабильность качества кефира в течение срока годности и целенаправленно управлять составом микробного консорциума. Кроме того, учитывая показанную вариабельность микробного состава кефирных грибов различного происхождения (Walsh et al., 2023), анализ сукцессии в конкретных системах является необходимым этапом для разработки стандартизированных заквасок и повышения воспроизводимости ферментированных молочных продуктов. Таким образом, анализ динамики микробного сообщества кефира представляет собой ключ к интерпретации механизмов функционирования симбиотического консорциума и к его рациональному использованию в биотехнологической практике.

Гипотеза исследования: микробное сообщество кефирных зёрен характеризуется относительной таксономической стабильностью, тогда как микробиота жидкой фазы демонстрирует направленные изменения, обусловленные сукцессионными процессами.

Целью данного исследования являлась оценка динамики состава микробного сообщества кисломолочного напитка, приготовленного с использованием кефирных грибов, на протяжении всего процесса приготовления и хранения — от этапа внесения лиофилизированных кефирных грибов в молоко до образования продукта с истекшим сроком годности.

Исследовательские вопросы:

RQ#1: Как изменяется таксономический состав микробного сообщества на последовательных стадиях активации кефирных грибов, ферментации и хранения кефира?

RQ#2: Сохраняется ли стабильность микробного состава кефирных грибов в процессе ферментации и какова степень их участия в формировании микробиома жидкой фазы?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В качестве исходного материала использовались лиофилизированные кефирные грибки, используемые на промышленных предприятиях Центрального федерального округа Российской Федерации. Образцы были получены из коллекции молочнокислых и пробиотических микроорганизмов ФГАНУ «ВНИМИ» (Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, г. Москва).

Подготовка образцов

Восстановление сухого молока и пастеризация

Молоко восстанавливали путём растворения 20 г сухого обезжиренного коровьего молока в 200 мл дистиллированной воды, температура которой составляла 25–30 °С. Смесь перемешивали с использованием магнитной мешалки в течение 5 минут, после чего оставляли при комнатной температуре до полного рас-

творения. Пастеризация восстановленного молока осуществлялась на водяной бане при режиме 2–8 минут при 92,5 °С.

Выработка кефира

Приготовление кефира производилось согласно типовой технологической инструкции ТТИ ГОСТ Р 52093–005.

Активирование кефирных грибов

Для метаболической активации кефирных грибов 1 г лиофилизированного материала вносили в 200 мл восстановленного пастеризованного обезжиренного молока, предварительно подогретого до 20 °С. Инкубация проводилась в лабораторных стеклянных стаканах объёмом 250 мл, предварительно стерилизованных в автоклаве (121 °С, 20 мин) и негерметично закрытых стерилизованной алюминиевой фольгой. Смесь инкубировали в термостате ТС-1/20 (СКТБ СПУ, Россия) при температуре 20 °С в течение 48 часов (Рисунок 1). По окончании первой инкубации кефирные грибки отделяли от жидкости с помощью мелкоячеистого сита,

Рисунок 1

Технология приготовления кисломолочных напитков с использованием кефирных грибов

Figure 1

Technology for Preparing Fermented Milk Drinks Using Kefir Grains



после чего молочную среду заменяли на свежую и инкубировали 24 часа. Процедуру замены среды с последующей 24-часовой инкубацией повторяли трижды.

Приготовление кефирной закваски

Для приготовления закваски 3,3 г активированных кефирных грибов вносили в 100 мл пастеризованного обезжиренного молока, температура которого составляла 20 °С. Смесь инкубировали в термостате ТС-1/20 (СКТБ СПУ, Россия) при температуре 20 °С в течение 24 часов (Рисунок 1). По завершении инкубации образовывался плотный сгусток с характерной глянцевой поверхностью, что свидетельствовало о готовности закваски к использованию.

Ферментация и созревание кефира

Для непосредственного приготовления кефира полученную закваску гомогенизировали с использованием магнитной мешалки без предварительного удаления кефирных зёрен. В процессе зёрна частично разрушались, однако для последующего этапа ферментации отбирали исключительно 5 мл жидкой фракции закваски, содержащей микробную суспензию, без видимых включений целых зёрен, и вносили её в 95 мл пастеризованного молока. Смесь тщательно перемешивали и помещали в стерильный стеклянный сосуд с плотно закрывающейся крышкой. Инкубацию проводили в термостате ТС-1/20 (СКТБ СПУ, Россия) при температуре 20 °С в течение 8 часов. После окончания ферментации образовавшийся глянцевый сгусток вновь подвергали перемешиванию на магнитной мешалке в течение 5 минут. После этого образец помещали в холодильник Indesit (Россия) при температуре +4 °С на 8 часов для созревания. По завершении охлаждения продукт считался готовым (Рисунок 1).

Хранение

Готовый кефир хранили в холодильнике Indesit (Россия) при +4 °С.

Отбор образцов для молекулярно-генетического анализа

Для проведения молекулярно-генетических анализов отбор образцов осуществлялся на различных этапах ферментационного процесса и последующего хранения готового продукта. Все манипуляции проводились

в асептических условиях с соблюдением мер, направленных на предотвращение контаминации.

Отбор проводился на следующих стадиях ферментации:

- (1) Лиофилизированные кефирные грибки — по 50 мг образца.
- (2) Метаболически активные кефирные зёрна — после 48 ч культивирования в пастеризованном молоке отбирали по 50 мг разбухших зёрен.
- (3) Закваска — после завершения 48-часовой ферментации кефирные грибки удаляли, полученную закваску перемешивали и отбирали по 1 мл для анализа.
- (4) Нулевая точка ферментации — сразу после внесения 5 мл закваски в 95 мл пастеризованного молока и тщательного перемешивания отбирали по 1 мл.
- (5) Через 8 ч ферментации при 20 °С — отбирали по 1 мл продукта.
- (6) После завершения ферментации (8 ч при 20 °С и последующие 8 ч при хранении в холодильнике) — по 1 мл готового кефира.
- (7) После хранения готового продукта: через 7, 14 и 21 сут — по 1 мл на каждом этапе.

Для каждой точки отбора было выполнено 10 технических повторов. Пробоподготовка жидких образцов включала центрифугирование каждой пробы с использованием мини-центрифуги Microspin 12 (Biosan, Латвия) в стерильных пробирках типа «Эппендорф» при 10 000 × g в течение 5 минут. Надосадочную жидкость аккуратно удаляли, а полученный микробный осадок хранили при –20 °С до этапа выделения ДНК.

Выделение ДНК

Экстракция нуклеиновых кислот производилась с помощью набора «ГМО — МагноСорб» (Синтол, Россия) в соответствии с инструкцией производителя. Концентрацию ДНК в полученных препаратах измеряли на флуориметре Qubit 4 (Invitrogen, США) с использованием набора реагентов QuDye® dsDNA BR (ООО «Люмипроб РУС», Россия). Объем исследуемой пробы составлял 5 мкл. Кроме того, производилось определение ряда качественных параметров образцов ДНК (A260, A280, A230 — оптической плотности при 260 нм, 280 нм и 230 нм соответственно) и их соотношений с использованием спектрофотометра Nano-500 (Allsheng, КНР) в объеме 1 мкл.

Секвенирование и биоинформатический анализ данных

Полученные пробы ДНК объединяли в равных количествах (20 мкл) для формирования объединённой усреднённой пробы для каждой временной точки.

Подготовка ДНК-библиотек для проведения полногеномного метагеномного секвенирования методом обратимого терминирования проводилась с помощью набора реагентов «SG GM Plus» производства ООО «Сесана» (Россия) с использованием магнитных частиц для селективной очистки ДНК «Smart beads» (ООО «Сесана», Россия). Ферментативная фрагментация ДНК проводилась в течение 25 минут при температуре 65 °C на амплификаторе MiniAmp Thermal Cycler торговой марки Applied Biosystems (Thermo Fisher Scientific, США). Двойное индексирование осуществляли с использованием набора индексированных праймеров №1 «Plate1_SG_GM», используемых для подготовки полногеномных библиотек на платформе Illumina (ООО «Сесана», Россия). Контроль качества библиотек осуществляли на приборе Bioptric Qsep100 (Bioptric, КНР) с использованием картриджа для рутинного анализа ДНК S2 (Bioptric, КНР) со следующими параметрами: напряжение ввода образца 4 кВ в течении 10 секунд, разделение при 10 кВ — 200 секунд.

Секвенирование выполнено на платформе GeneMind FASTASeq300 (GeneMind, КНР) на базе ЦКП «ВНИМИ». Для проведения секвенирования использована прочная ячейка FCM и набор реагентов для секвенирования FASTASeq 300 Sequencing Reagent V 1.0 на 300 циклов в режиме PE150 (GeneMind, КНР).

Сырые данные секвенирования были обработаны с использованием программного обеспечения CutAdapt 5.2 (Marcel Martin, Германия) для удаления последовательностей адаптеров. Результирующие fastq-файлы были триммированы в приложении Trimmomatic v0.40 (Usadel Lab, Германия) путём отрезания с конца каждого прочтения нуклеотидов с качеством ниже 20. Анализ качества прочтений до и после очистки производился с помощью инструмента FastQC v0.12.1 (Babraham Bioinformatics, Великобритания).

Иерархическая метагеномная классификация проводилась с использованием программного обеспечения Kraken2 v2.17.0 (JHU CCB, США) (Wood, Lu & Langmead, 2019) на основе предварительно индексированной

базы данных PlusPF (сборка от 5 июня 2024 года) размером 83 Гб, включающей в себя индексированные референсные последовательности архей, бактерий, вирусов, человека, векторных конструкций, а также грибов и простейших (доступ по ссылке: https://genome-idx.s3.amazonaws.com/kraken/k2_pluspf_20240605.tar.gz). Реклассификация коротких прочтений и оценка распространённости видов в сообществах на основе метагеномных данных осуществлялась с применением специализированного программного продукта Bracken 2.7 (JHU CCB, США) (Lu et al., 2017). Вычисление метрик биоразнообразия выполнялось при помощи пакета прикладных программ KrakenTools 1.2 (JHU CCB, США) (Lu et al., 2022). Визуализация результатов классификации, полученных с помощью Kraken2, проводили при помощи веб-приложения Pavian v 1.0 (JHU CCB, США) (Breitwieser and Salzberg, 2019).

Процедура исследования

В ходе исследования был воспроизведён полный технологический цикл приготовления кефира с последовательным отбором проб для анализа микробного состава на всех его этапах. На первом этапе проводили восстановление сухого обезжиренного молока и его термическую обработку с последующим отбором проб. Одновременно отбирали образцы лиофилизированных кефирных грибов.

Далее восстановленное пастеризованное молоко инокулировали кефирными грибами. В процессе их метаболической активации выполняли последовательные пересевы с заменой молочной среды и отбором проб. После завершения стадии активации осуществляли приготовление кефирной закваски и кефира, отбирая образцы на различных стадиях ферментации, созревания и хранения готового продукта.

На заключительном этапе из отобранных образцов выделяли тотальную ДНК, готовили библиотеки для полногеномного метагеномного секвенирования, проводили секвенирование и биоинформатическую обработку данных с последующим анализом таксономического состава микробных сообществ.

Анализ данных

Анализ метагеномных данных был направлен на оценку таксономической структуры микробных сообществ и её изменений на различных стадиях ферментации

и хранения кисломолочного напитка. Относительную представленность таксонов на уровне вида рассчитывали, как долю прочтений таксона от общего числа классифицированных прочтений.

Оценку α -разнообразия проводили с использованием индексов Берга–Паркера, Шеннона, Симпсона и обратного Симпсона. Для оценки β -разнообразия использовали расстояния Брэй–Кёртиса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследования проанализирована динамика микробного сообщества на последовательных этапах активации кефирных грибов, ферментации и последующего хранения готового продукта с использованием полногеномного метагеномного секвенирования. Полученные данные позволили определить таксономический состав микробиоты кефирных зёрен и жидкой фазы на различных временных точках, а также выявить ключевые закономерности в перестройке сообщества. Были изучены количественные изменения доминирующих и минорных таксонов, оценены показатели альфа- и бета-разнообразия, а также прослежены сукцессионные процессы, которые формируют структуру микробного консорциума на всех стадиях технологического процесса. Ниже представлены основные результаты таксономического анализа, динамики численности отдельных видов и оценка их вклада в формирование микробной экосистемы кефира.

Полногеномное секвенирование метагеномной ДНК образцов отобранных на различных этапах активации, ферментации и хранения кефира платформе FASTASeq 300

В результате полногеномного секвенирования ДНК-библиотек, подготовленных из образцов метагеномной ДНК кефирных грибов, было получено 86,66 млн прочтений с качеством $Q30 = 95,09\%$. Плотность кластеров, сформированных в ходе мостиковой ПЦР, составила 534 тыс./мм². Уровень демультимплексирования достиг 88,13%, а средний GC-состав — 39,32%. Основные полученные в результате анализа метрики качества секвенирования приведены в Таблице 1.

Результаты метагеномной таксономической классификации

Полученные после очистки и фильтрации по качеству прочтения были использованы для проведения метагеномной классификации микробного сообщества кефирных зёрен и кефира на каждом из исследованных временных участков. Запуск программы Kraken2 производился с использованием прямых прочтений с параметром «--minimum-hit-groups», равным двум. В ходе запуска программы было установлено, что количество классифицированных коротких прочтений колебалось от 61,4% до 96,7% (Рисунок 2). Наибольшее относительное количество бактериальных видов наблюдалось

Таблица 1

Результаты работы FastQC на коротких прочтениях

Table 1

FastQC Results on Short Reads

	Сырые данные			Данные после фильтрации		
	Объём данных	Число прочтений	GC, %	Объём данных	Число прочтений	GC, %
Точка 1	1,8 Gbp	12075152	40	1,6 Gbp	12072151	39
Точка 2	2,1 Gbp	14397231	41	1,8 Gbp	14394818	40
Точка 3	826,9 Mbp	5513010	37	773,5 Mbp	5510207	36
Точка 4	756,7 Mbp	5044833	38	704,8 Mbp	5042944	37
Точка 5	1 Gbp	7291471	42	969,9 Mbp	7282521	41
Точка 6	875,5 Mbp	5837135	38	822 Mbp	5835137	37
Точка 7	561,5 Mbp	3743732	39	518,4 Mbp	3739558	38
Точка 8	1,1 Gbp	7859937	38	1 Gbp	7857234	37
Точка 9	1,1 Gbp	7930818	38	1,1 Gbp	7926960	37
Точка 10	1 Gbp	6673510	39	912,7 Mbp	6670356	37

Рисунок 2

Результаты проведения иерархической метатеномной классификации, отражающей изменения в видовом разнообразии микробного сообщества кефирных грибов в процессе приготовления и созревания кефира

Figure 2

Results of Hierarchical Metagenomic Classification Showing Changes in the Species Diversity of the Kefir Grain Microbial Community during Kefir Production and Ripening

Name	Number of raw reads	Classified reads	Chordate reads	Artificial reads	Unclassified reads	Microbial reads	Bacterial reads	Viral reads	Fungal reads	Protozoan reads
asenievskie_point_01	12,072,151	61.4%	0.0152%	0%	38.6%	61.3%	60.5%	0.0354%	0.798%	0.0122%
asenievskie_point_02	14,394,818	92.7%	0.00952%	0%	7.31%	92.5%	91.5%	0.224%	0.755%	0.00512%
asenievskie_point_03	5,510,207	65%	0.185%	0%	35%	59.2%	49.9%	8.91%	0.0265%	0.164%
asenievskie_point_04	5,042,944	94.9%	0.13%	0%	5.1%	92.7%	91.1%	1.25%	0.0319%	0.112%
asenievskie_point_05	7,282,521	66.6%	2.32%	0%	33.4%	63.2%	57.2%	0.713%	0.0119%	2.57%
asenievskie_point_06	5,835,137	95.4%	0.199%	0%	4.64%	93.7%	91.5%	1.47%	0.00374%	0.326%
asenievskie_point_07	3,739,558	89.9%	0.524%	0%	10.1%	87.1%	82.7%	2.9%	0.0953%	0.678%
asenievskie_point_08	7,857,234	96.7%	0.111%	0%	3.27%	95.2%	93.8%	1.09%	0.00177%	0.149%
asenievskie_point_09	7,926,960	94.8%	0.159%	0%	5.2%	92.1%	89.1%	2.46%	0.00185%	0.237%
asenievskie_point_10	6,670,356	94.5%	0.189%	0%	5.5%	92.1%	89.3%	2.18%	0.00232%	0.27%
A										
Name	Number of raw reads	Classified reads	Chordate reads	Artificial reads	Unclassified reads	Microbial reads	Bacterial reads	Viral reads	Fungal reads	Protozoan reads
asenievskie_point_01	12,072,151	7,409,520	1,836	0	4,662,631	7,405,291	7,298,294	4,272	96,289	1,476
asenievskie_point_02	14,394,818	13,342,069	1,371	0	1,052,749	13,318,654	13,173,014	32,313	108,704	737
asenievskie_point_03	5,510,207	3,580,516	10,216	0	1,929,691	3,263,322	2,752,308	490,898	1,460	9,031
asenievskie_point_04	5,042,944	4,785,623	6,551	0	257,321	4,673,870	4,595,724	63,155	1,610	5,629
asenievskie_point_05	7,282,521	4,849,543	168,850	0	2,432,978	4,600,763	4,165,668	51,892	863	187,371
asenievskie_point_06	5,835,137	5,564,253	11,631	0	270,884	5,466,659	5,341,361	85,776	218	18,998
asenievskie_point_07	3,739,558	3,361,855	19,613	0	377,703	3,256,263	3,092,229	108,330	3,562	25,369
asenievskie_point_08	7,857,234	7,600,134	9,321	0	257,100	7,483,943	7,372,049	85,911	139	11,722
asenievskie_point_09	7,926,960	7,515,059	12,598	0	411,901	7,301,574	7,065,573	195,275	147	18,804
asenievskie_point_10	6,670,356	6,303,519	12,620	0	366,837	6,141,616	5,956,790	145,590	155	17,993
B										

Примечание. А — относительная представленность различных таксонов; В — соответствующее им количество коротких прочтений

Note. A — relative abundance of the different taxa; B — corresponding number of short reads

в точке № 8 и составляло 93,8 % прочтений, в то время как наибольшей представленностью грибов характеризовалась точка №1 — 0,798 % от всех полученных коротких прочтений. Вирусные последовательности были наиболее обильны в точке № 3 (8,91 %), в то время как лиофилизированные кефирные грибки отличались их наименьшим содержанием — всего лишь 0,0354 %.

Таксономический и численный состав лиофилизированных кефирных зёрен

Микробиота лиофилизированных грибов характеризовалась высокой степенью доминирования одного вида. Абсолютное количество прочтений составило в сумме более 7.34 миллионов. Наибольшую численность продемонстрировал таксон *Lactobacillus kefiranofaciens*., составивший 5 891 484 прочтения, что соответствует 80,22 %

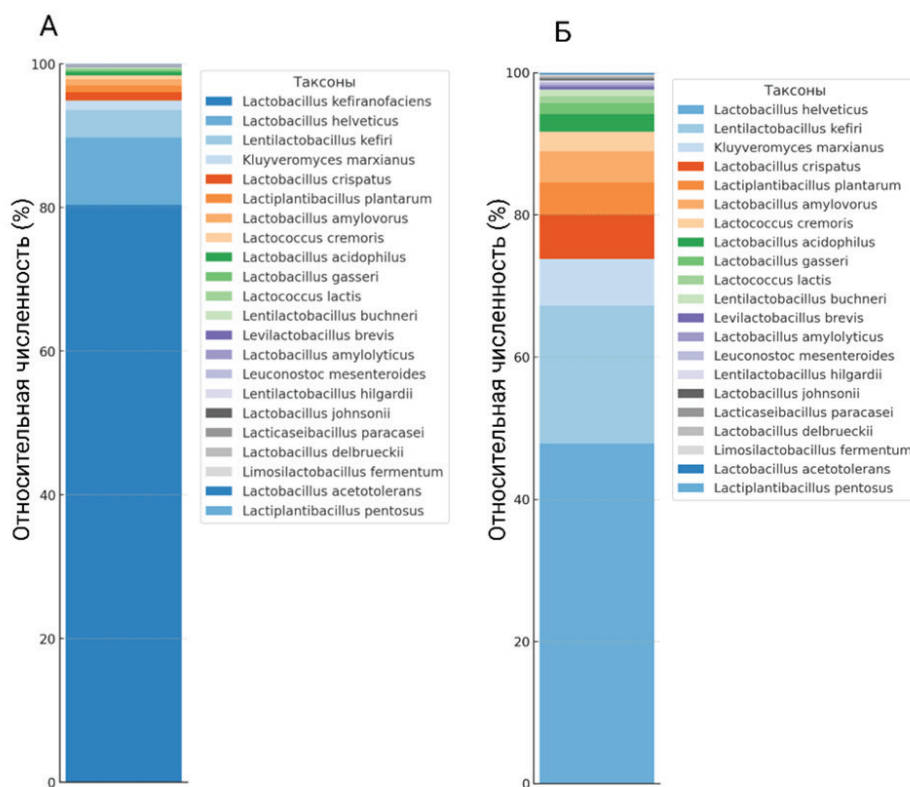
от общего микробного пула. Этот вид однозначно доминирует в составе и отражает его важную структурную и метаболическую роль в кефирных зёрнах. Вторым по численности оказался *Lactobacillus helveticus* (693 071 прочтений или 9,44 %), а третьим — *Lentilactobacillus kefir* (284 643 прочтений, 3,88 %). Эти три вида суммарно составляли более 93,5 % от общего числа секвенированных прочтений, что свидетельствует о выраженном доминантном ядре микробиоты. К субдоминантам относились *Kluyveromyces marxianus* (1,29 %), *Lactobacillus crispatus* (1,23 %), *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lactobacillus amylovorus* и *Lactococcus cremoris* — от 0,6 до 0,8 %. Остальные виды, включая *Leuconostoc mesenteroides*, *Lactobacillus johnsonii*, *Lacticaseibacillus paracasei* и *Limosilactobacillus fermentum*, присутствовали в следовых количествах (<0,1 %) и формировали дополнительный микроразнообразный фон сообщества (Рисунок 3, 4).

Рисунок 3

Относительная численность (%) микроорганизмов лиофилизированных кефирных грибов на уровне видов

Figure 3

Relative Abundance (%) of Microorganisms in Lyophilized Kefir Grains at the Species Level



Примечание. А — полный профиль; Б — относительный состав микробного сообщества без доминирующего микроорганизма *L. kefiranofaciens*

Note. A — complete profile; B — relative composition of the microbial community without the dominant microorganism *L. kefiranofaciens*

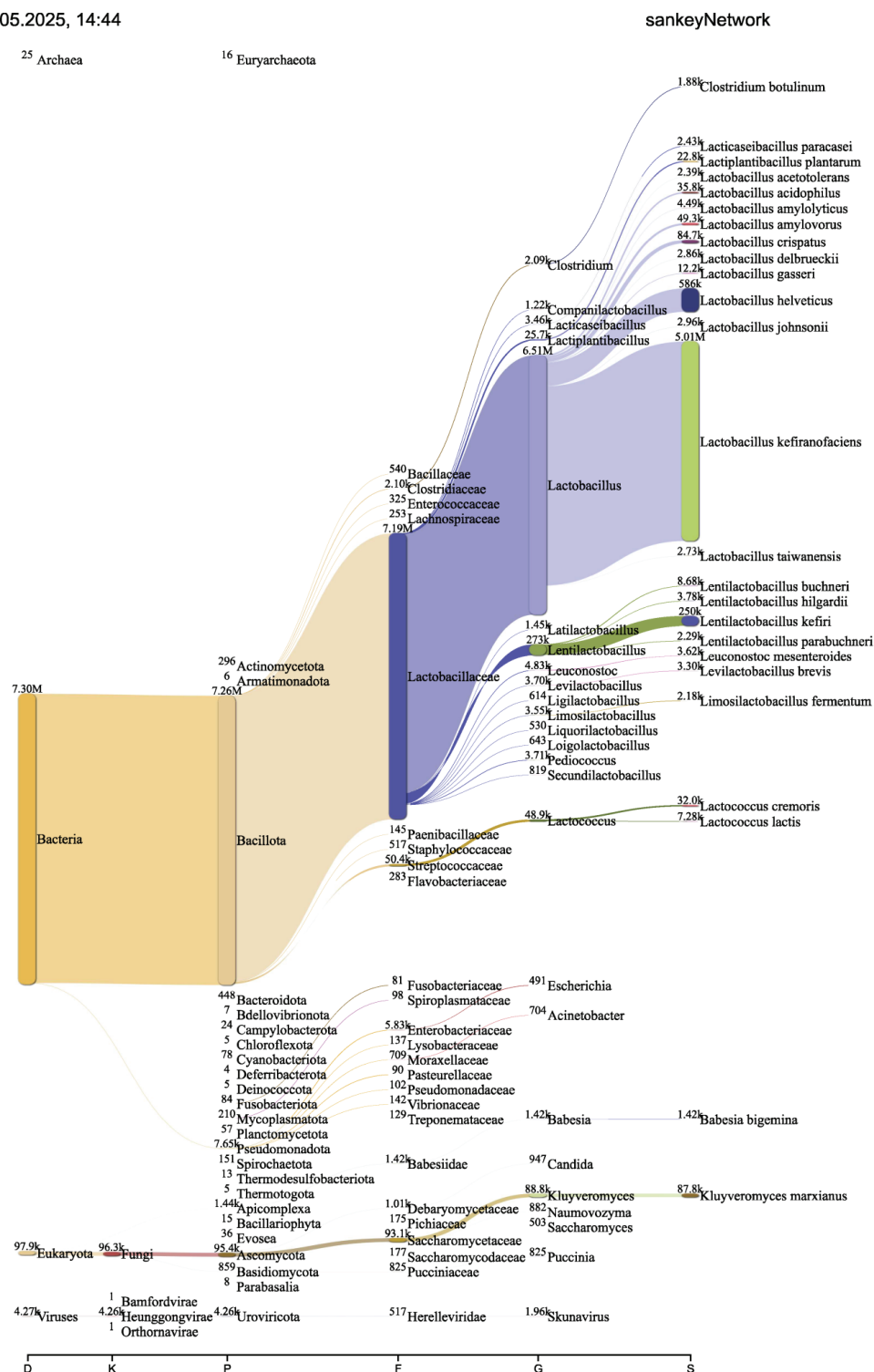
Рисунок 4

Таксономический профиль микробного сообщества лиофилизированных кефирных грибов

Figure 4

Taxonomic Profile of the Microbial Community of Lyophilized Kefir Grains

16.05.2025, 14:44



Примечание. Ось X соответствуют таксономическим уровням: D — домен; K — царство; P — тип; C — класс; O — отряд; F — семейство; G — род; S — вид.
Note. The X-axis corresponds to the taxonomic levels: D — domain; K — kingdom; P — phylum; C — class; O — order; F — family; G — genus; S — species.

Таким образом, микробное сообщество лиофилизированных кефирных грибов отличалось низким уровнем таксономического разнообразия и высокой степенью неравномерности распределения видов, что подтверждается низкими значениями индексов Шеннона (0,93) и Симпсона (0,36).

Большинство идентифицированных видов относятся к гомоферментативным молочнокислым бактериям, осуществляющим преимущественно образование молочной кислоты. К данной группе относятся *Lactococcus lactis*, *L. cremoris*, *Lactobacillus acidophilus*, *L. acetotolerans*, *L. gasseri*, *L. helveticus*, *L. crispatus*, *L. delbrueckii*, *L. plantarum*, *Lactiplantibacillus pentosus*, *L. paracasei* и *L. johnsonii*. Гетероферментативные молочнокислые бактерии, продуцирующие наряду с молочной кислотой также CO₂, этанол и/или уксусную кислоту, представлены видами: *L. mesenteroides*, *L. brevis*, *L. kefir*, *L. fermentum*,

L. kefirifaciens и *Lentilactobacillus hilgardii*, *L. buchneri*. Дрожжевой компонент микробиоты был представлен одним видом — *K. marxianus*.

Через 48 часов ферментации микробное сообщество кефирных зёрен претерпело заметные изменения (Рисунок 5).

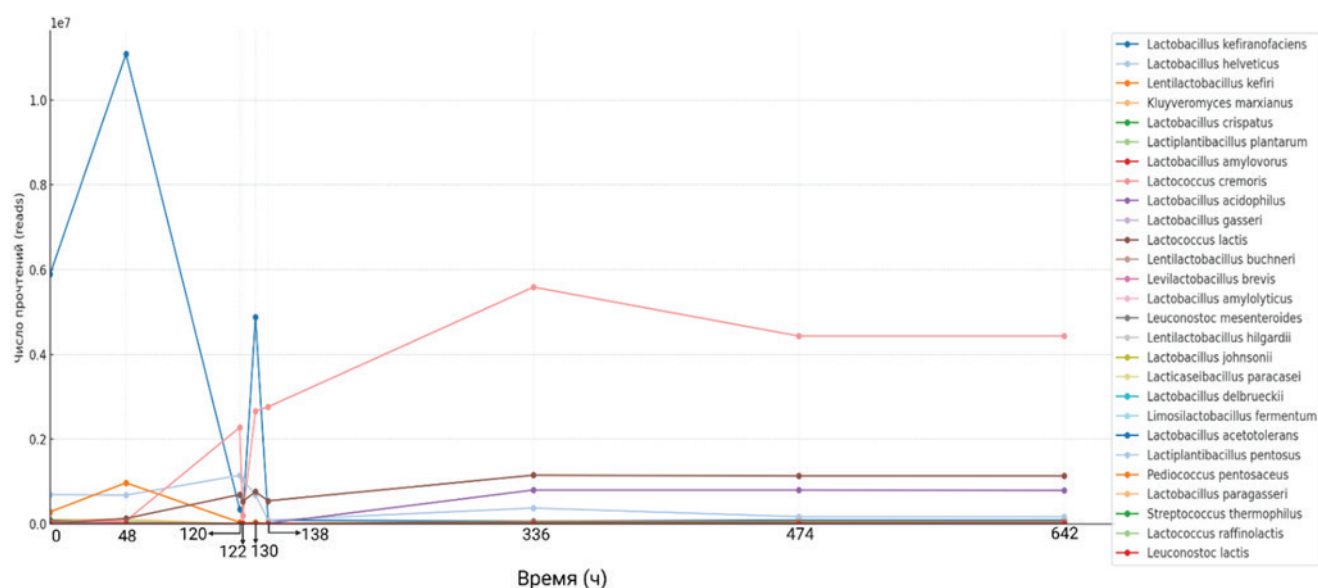
К 48 часам микробиота по-прежнему характеризовалась доминированием *L. kefirifaciens*, доля которого составляла 82,4% от общего микробного пула. Это подтверждает его ключевую роль в структуре и функционировании зрелого зерна. Вторым по численности остался *L. helveticus* (5,1%), а третье место занял *L. kefir*, доля которого увеличилась по сравнению с исходным уровнем, достигнув 7,3%. Существенный рост также наблюдался у представителей рода *Lactococcus*: *L. cremoris* и *L. lactis* составили соответственно 0,53% и 0,97%. Многочисленные исследования рассматрива-

Рисунок 5

Динамика микробного сообщества на последовательных этапах активации кефирных грибов, формирования закваски и ферментации кефира

Figure 5

Dynamics of the Microbial Community at Successive Stages of Kefir Grain Activation, Starter Formation and Kefir Fermentation



Примечание. 0 ч — лиофилизированные грибки, 48 ч — метаболически активные (разбухшие) кефирные грибки, 120 ч — кефирная закваска, 122 ч — внесение 5% закваски в молоко, 130 ч — спустя 8 часов после ферментации при +20 °С, 138 ч — спустя 8 часов после ферментации при +4 °С, 336 ч — микробное сообщество кефира после 7 дней хранения при +4 °С, 474 ч — микробиом кефира спустя 14 дней хранения при +4 °С, 642 ч — микрофлора кефира спустя 21 день после хранения при +4 °С.

Note. 0 h — lyophilized fungi, 48 h — metabolically active (swollen) kefir fungi, 120 h — kefir starter, 122 h — adding 5% starter to milk, 130 h — 8 hours after fermentation at +20 °C, 138 h — 8 hours after fermentation at +4 °C, 336 h — kefir microbial community after 7 days of storage at +4 °C, 474 h — kefir microbiome after 14 days of storage at +4 °C, 642 h — kefir microflora after 21 days of storage at +4 °C.

ют *L. kefiranofaciens* как один из наиболее стабильных и доминирующих компонентов кефирных грибов, а совместное присутствие *L. kefiranofaciens* и представителей вида *L. kefir* описывается как типичная характеристика микробного ядра (Plessas et al., 2016).

Одновременно *L. helveticus* также нередко фиксируется в составе кефирных грибов и относится к числу часто встречающихся доминантных/субдоминантных видов, что согласуется с его сохранением в нашем эксперименте на стадии активации (González-Orozco et al., 2023).

Доля дрожжевого таксона *K. marxianus* также увеличилась, достигнув 0,79%. На фоне роста ряда ключевых молочнокислых бактерий численность некоторых ранее присутствующих видов, напротив, значительно снизилась. Так, *L. crispatus* уменьшился до 0,16%, *L. amylovorus* — до 0,15%, *L. acidophilus* — до 0,06%, а *L. gasseri* — до 0,03%. Примечательно, что к этому времени впервые в составе микробиоты были выявлены *Pediococcus pentosaceus* (0,01%) и *Lactobacillus paragasseri* (0,01%), доля которых в лиофилизированных зёрнах была менее 0,01%.

Таким образом, спустя 48 часов ферментации микробное сообщество сохраняло выраженное доминирование *L. kefiranofaciens*, при этом отмечалось увеличение таксономического разнообразия, обусловленное метаболической активацией отдельных таксонов, приводящей к выявлению видов, ранее не детектированных в лиофилизированных кефирных зёрнах.

Микробиом готовой кефирной закваски (120 ч)

На 120-м часу ферментации наблюдаются выраженные количественные изменения в структуре микробного сообщества (Рисунок 5). Численность ряда таксонов существенно изменилась по сравнению с предыдущим временным интервалом (0–48 ч): *L. cremoris* увеличился более чем в 32 раза: с 71 028 до 2 275 901 прочтений, став доминирующим видом на данном этапе. *L. helveticus* также продемонстрировал значительный рост — с 678 251 до 1 146 310 прочтений. *L. lactis* увеличился с 129 135 до 692 205 прочтений, что соответствует росту в ~5,4 раза. Одновременно произошло резкое снижение численности ранее доминирующего таксона: *L. kefiranofaciens* уменьшился с 11 081 207 до 346 473 прочтений, потеряв более 96% своей численности. Снижение численности также наблюдалось у: *L. kefir* — с 969 214 до 38 778 прочтений (уменьшение

на 96%). В составе микробиоты на 120 ч был впервые зафиксирован таксон: *Streptococcus thermophilus* — присутствует на уровне 4 605 прочтений, не обнаруженный на предыдущих временных точках. В то время как обнаруженные на предыдущем этапе таксоны, как *P. pentosaceus* и *L. paragasseri* не были детектированы, так как их численность оказались ниже порога обнаружения (0,1%). Вероятно, это связано с селективным давлением среды на поздних этапах ферментации (снижение pH) и конкурентным доминированием лактококков, типично наблюдаемым в готовом кефире, в результате чего ряд минорных компонентов консорциума сохраняется на следовых уровнях.

Временная точка 120 часов характеризуются переходом к новому микробному балансу с преобладанием *L. cremoris*, *L. lactis* и *L. helveticus*, а также значительным сокращением популяции *L. kefiranofaciens*.

Сукцессия микробиоты при производстве кефира

Микробный состав начальной точки приготовления кефира — этап внесения кефирной закваски в молоко (122 часа)

На 122-м часу ферментации, соответствующем моменту добавления 5% закваски в молоко, микробное сообщество характеризовалось преобладанием представителей молочнокислых бактерий (Рисунок 5). Доминирующим видом на данном этапе являлся *L. helveticus* — 1 045 059 прочтений, что составляет 52% от общего микробного пула. Далее следовали *L. lactis* — 535 682 прочтения (26,7%) и *L. cremoris* — 206 697 прочтений (10,3%).

Несмотря на снижение численности по сравнению с ранними этапами, *L. kefiranofaciens* продолжал присутствовать в составе сообщества, составив 200 068 прочтений (10%). В умеренном количестве сохранялся также *L. kefir* — 20 766 прочтений, что соответствует 1% от общего числа секвенированных фрагментов.

Этап ферментации кефира в термостате продолжительностью 8 часов (временная точка — 130 ч)

После внесения закваски и восьмичасовой ферментации в термостате (130 ч) микробное сообщество демонстрирует признаки активной ферментативной фазы. На этом этапе наблюдается значительное увеличение

численности ряда таксонов. *L. kefiranofaciens* вновь усиливает свои позиции, достигнув 4 878 051 прочтений (54,1%), что свидетельствует о его реактивации и участии в поддержании экзополисахаридного матрикса. *L. cremoris* достигает 2 662 544 прочтений (29,5%), *L. lactis* продолжает наращивать численность — 759 435 прочтений (8,4%), способствуя дальнейшему подкислению среды. *L. helveticus* сохраняется на стабильном уровне — 680 793 прочтений (7,5%), обеспечивая протеолитическую активность. *L. kefir* фиксируется в количестве 36 789 прочтений, что составляет 0,4% от общего числа секвенированных фрагментов.

Микробное сообщество готового кефира (138 часов)

После термостатной инкубации следует восьмичасовой этап дозревания и стабилизации продукта в условиях охлаждения при +4°C. После охлаждения (временная точка — 138 часов) напиток считается готовым. К 138 часу ферментации микробное сообщество претерпевает значительные изменения, указывающие на завершение активной фазы брожения. *L. cremoris* остаётся доминирующим таксоном, его численность составляет 2 760 970 прочтений (~55%), что подтверждает его ключевую роль в поддержании молочно-кислого метаболизма. *L. lactis* сохраняется в числе доминирующих видов, несмотря на снижение численности до 321 501 прочтения (~6,4%). *L. kefiranofaciens*, ранее демонстрировавший высокую активность, на этом этапе резко снижает свою численность до 88 024 прочтений (~1,8%), что указывает на завершение его участия в формировании экзополисахаридного матрикса. Схожая тенденция наблюдается и для *L. helveticus*, численность которого составляет 88 108 прочтений (~1,8%), что может отражать угасание протеолитической активности. *L. acidophilus* сохраняется на низком уровне — 14 000 прочтений (~0,3%), оставаясь минорным компонентом микробного сообщества на данной стадии ферментации.

Сукцессия микробного сообщества кефира в процессе хранения

Кефир 7 дней

На 306-м часу эксперимента микробное сообщество кефира демонстрирует значительные сдвиги в структуре, свидетельствующие о стабилизации процесса и смещении метаболической активности к устойчивым молоч-

нокислым формам. В сравнении с предыдущим этапом (138 ч), наблюдаются следующие ключевые изменения: *L. cremoris* продолжает занимать лидирующее положение и демонстрирует интенсивный рост численности: с 2 760 970 до 5 585 568 прочтений, более чем удваиваясь за рассматриваемый период. Это свидетельствует о его центральной роли в поддержании молочно-кислого брожения и стабильности заквасочной активности. *L. lactis* также увеличивает численность с 544 785 до 1 149 690 прочтений, оставаясь вторым по значимости видом в кокковом доминантном ядре. *L. acidophilus* демонстрирует внезапный рост — с 14 000 до 800 000 прочтений, что может указывать на активацию его популяции на поздней фазе ферментации, возможно, благодаря снижению конкурентного давления или адаптации к среде, насыщенной метаболитами. *L. helveticus* восстанавливает численность после снижения, увеличиваясь с 88 108 до 373 804 прочтений, что может отражать его участие в поздней протеолитической активности и формировании вкусового профиля продукта. Напротив, численность *L. kefiranofaciens* продолжает снижаться (с 88 347 до 62 168 прочтений), что, вероятно, связано с исчерпанием субстрата, необходимого для его экзополисахаридообразующей активности.

Этап 306 часов характеризуется консолидацией молочно-кислых кокков (*L. cremoris* и *L. lactis*) как ключевых игроков, а также включением дополнительных лактобацилл (в частности, *L. acidophilus*) в поддержание микробной стабильности и метаболической активности на поздних стадиях ферментации.

Кефир 14 дней

На 474-м часу ферментации наблюдаются следующие изменения: *L. cremoris*, оставаясь ведущим таксоном, снизил численность с 5 585 568 до 4 431 993 прочтений. Несмотря на уменьшение, он продолжает играть ключевую роль в поддержании молочно-кислой среды. *L. lactis* сохранил численность на прежнем уровне (снижение на ~18 тыс. прочтений). *L. acidophilus* остаётся на стабильном уровне (800 000 прочтений). *L. helveticus* демонстрирует снижение численности более чем в 2 раза (с 373 804 до 170 870 прочтений), что может указывать на спад его протеолитической функции. Примечательно, что *L. kefiranofaciens*, напротив, увеличил численность с 62 168 до 89 682 прочтений, что может свидетельствовать о временной реактивации.

Кефир 21 день

На 642-м часу ферментации микробное сообщество демонстрирует максимальную стабильность: численность всех ключевых таксонов либо сохраняется, либо изменяется незначительно. *L. cremoris* остаётся неизменным доминантом (4 431 993 прочтений), поддерживая стабильную кислотность среды. *L. lactis* также демонстрирует абсолютную стабильность (1 131 730 прочтений), подтверждая завершённую заквасочную активность. *L. acidophilus* слегка снизился — с 800 000 до 790 000 прочтений (–1,25%), однако сохраняет высокую численность, указывая на его роль в поздних фазах ферментации и возможной консервации. *L. helveticus* и *L. kefiranofaciens* остались на прежнем уровне (170 870 и 89 682 прочтений соответственно), что говорит о завершении всех фаз роста и метаболической активности этих видов.

Индексы биоразнообразия микробных сообществ кефирных грибов и готовой продукции

Альфа-разнообразие в контексте настоящего исследования отражает степень таксономического разнообразия микробных сообществ внутри каждого отдельного образца, включая как кефирные зёрна, так и жидкую фазу на различных этапах ферментации. Этот показатель позволяет количественно оценить, насколько сложным и сбалансированным является сообщество в каждый конкретный момент времени, а также отслеживать изменения в его структуре по мере протекания ферментационных процессов. Альфа-разнообразие включает в себя два ключевых аспекта: богатство видов (общее число таксонов, представленных в образце) и равномерность распределения (насколько равномерно представлены эти таксоны по численности).

Оценка альфа-разнообразия микробиоты проводилась с использованием индексов Берга–Паркера, Шеннона, Симпсона и обратного Симпсона.

На начальных стадиях (точка 1 — лиофилизированные кефирные зёрна, точка 2 — зёрна после метаболической активации) наблюдается высокая доля доминирующего таксона (индекс Берга–Паркера 0.796 и 0.831 соответственно), а также низкие значения индексов Шеннона (0.926 и 0.780) и Симпсона (0.356 и 0.302), что указывает на низкое разнообразие и выраженную неравномерность в распределении таксонов (Таблица 2). Это характерно для неактивных или только что ак-

тивированных сообществ, в которых преобладает ограниченное число видов.

С началом ферментации (точки 3–5) происходит значительное увеличение таксономического разнообразия: индекс Шеннона достигает максимума на Точке 5 (1.974), как и индекс Симпсона (0.760) и обратный индекс Симпсона (4.165), что свидетельствует о росте богатства видов и выравнивании их относительного обилия. Одновременно отмечается резкое снижение значения индекса Берга–Паркера (до 0.414), указывающее на ослабление доминантности одного вида. Эти

Таблица 2

Значения индексов альфа-разнообразия, вычисленных для экспериментальных точек

Table 2

Values of Alpha Diversity Indices Calculated for Experimental Points

Образец	Индекс разнообразия Берга — Паркера	Индекс разнообразия Шеннона	Индекс разнообразия Симпсона	Обратный индекс Симпсона
Точка 1	0.796	0.926	0.356	1.554
Точка 2	0.831	0.780	0.302	1.432
Точка 3	0.562	1.886	0.651	2.862
Точка 4	0.476	1.633	0.690	3.223
Точка 5	0.414	1.974	0.760	4.165
Точка 6	0.659	1.327	0.532	2.137
Точка 7	0.658	1.496	0.537	2.162
Точка 8	0.735	1.087	0.434	1.766
Точка 9	0.653	1.378	0.532	2.139
Точка 10	0.704	1.230	0.472	1.892

Примечание. Точка 1 — лиофилизированные зёрна (0 ч), точка 2 — метаболически активные (разбухшие) кефирные зёрна (48 ч), точка 3 — молочная среда, в которой культивировались зёрна (48 ч), 4 точка — кефирная закваска (120 ч), 5 точка — внесение 5% закваски в молоко (122 ч), 6 точка — спустя 8 часов после ферментации при +20 °C (130 ч), 7 точка — спустя 8 часов после ферментации при +4 °C (138 ч), 8 точка — микробное сообщество кефира после 7 дней хранения при +4 °C (336 ч), 9 точка — микробиом кефира спустя 14 дней хранения при +4 °C (474 ч), 10 точка — микрофлора кефира спустя 21 день после хранения при +4 °C (642 ч).

Note. Point 1 — lyophilized grains (0 h), point 2 — metabolically active (swollen) kefir grains (48 h), point 3 — milk medium in which the grains were cultivated (48 h), point 4 — kefir starter (120 h), point 5 — adding 5% starter to milk (122 h), point 6–8 hours after fermentation at +20 °C (130 h), point 7–8 hours after fermentation at +4 °C (138 h), point 8 — kefir microbial community after 7 days of storage at +4 °C (336 h), point 9 — kefir microbiome after 14 days of storage at +4 °C (474 h), point 10 — kefir microflora after 21 days of storage at +4 °C (642 h).

изменения отражают активную фазу микробной сукцессии, сопровождающуюся метаболической активацией ранее подавленных таксонов.

На более поздних этапах (Точки 6–10), соответствующих завершению ферментации и хранению продукта, отмечается умеренное снижение всех индексов разнообразия по сравнению с пиком в Точке 5. Индекс Шеннона снижается до 1.230 (Точка 10), а индекс Берга–Паркера возрастает до 0.704, что свидетельствует о частичной реструктуризации сообщества и селективном сохранении более устойчивых или метаболически активных таксонов (Таблица 2). Тем не менее, уровень разнообразия в этих точках остаётся выше, чем в исходных кефирных зёрнах, что указывает на формирование стабилизированного, но более разнообразного микробного сообщества в готовом продукте.

Бета-разнообразие (β -разнообразие) отражает степень различий в составе микробных сообществ между образцами, отобранными на разных этапах ферментации и хранения. Этот показатель позволяет оценить, насколько существенно изменяются таксономический состав и структура микробиоты в динамике.

На основе матрицы расстояний Брэй–Кёртиса была построена тепловая карта, отражающая таксономические различия между микробными сообществами в образцах, отобранных на различных этапах ферментации (Рисунок 6). Более тёмные оттенки красного соответствуют более высоким значениям индекса, указывающим на существенные различия в составе микробиоты.

Наибольшие различия в таксономическом составе наблюдаются между лиофилизированными кефирными зёрнами (точка 1) и микробным сообществом жидкой среды на стадии активации (точка 3), что указывает на выраженную перестройку микробиоты при переходе к ферментативной активности. В то же время состав самих кефирных зёрен после начала ферментации претерпевает менее значительные изменения, оставаясь более стабильным по сравнению с микробиотой жидкой фазы (точка 2). В то же время, минимальные различия выявлены между: кефиром, хранящимся 14 дней (9 точка) и кефиром, хранящимся 21 день (10 точка), что говорит о стабилизации микробной структуры в зрелом напитке после завершения ферментации и периода хранения.

Рисунок 6

Матрица бета-разнообразия между микробными сообществами различных временных точек

Figure 6

Beta Diversity Matrix between Microbial Communities at Different Time Points

	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6	Точка 7	Точка 8	Точка 9	Точка 10
Точка 1	0	0,305	0,958	0,8	0,83	0,857	0,949	0,921	0,903	0,941
Точка 2			0,951	0,849	0,87	0,885	0,948	0,928	0,913	0,942
Точка 3				0,613	0,655	0,632	0,578	0,629	0,558	0,575
Точка 4					0,163	0,226	0,23	0,41	0,384	0,37
Точка 5						0,311	0,258	0,485	0,458	0,453
Точка 6							0,28	0,214	0,194	0,154
Точка 7								0,423	0,404	0,33
Точка 8									0,087	0,113
Точка 9										0,088
Точка 10										0

Примечание. Точка 1 — лиофилизированные зёрна (0 ч), точка 2 — метаболически активные (разбухшие) кефирные зёрна (48 ч), точка 3 — молочная среда, в которой культивировались зёрна (48 ч), 4 точка — кефирная закваска (120 ч), 5 точка — внесение 5 % закваски в молоко (122 ч), 6 точка — спустя 8 часов после ферментации при +20 °C (130 ч), 7 точка — спустя 8 часов после ферментации при +4 °C (138 ч), 8 точка — микробное сообщество кефира после 7 дней хранения при +4 °C (336 ч), 9 точка — микробиом кефира спустя 14 дней хранения при +4 °C (474 ч), 10 точка — микрофлора кефира спустя 21 день после хранения при +4 °C (642 ч).

Note. Point 1 — lyophilized grains (0 h), point 2 — metabolically active (swollen) kefir grains (48 h), point 3 — milk medium in which the grains were cultivated (48 h), point 4 — kefir starter (120 h), point 5 — adding 5% starter to milk (122 h), point 6–8 hours after fermentation at +20 °C (130 h), point 7–8 hours after fermentation at +4 °C (138 h), point 8 — kefir microbial community after 7 days of storage at +4 °C (336 h), point 9 — kefir microbiome after 14 days of storage at +4 °C (474 h), point 10 — kefir microflora after 21 days of storage at +4 °C (642 h).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты демонстрируют чёткую последовательную смену доминирующих микроорганизмов в ходе ферментации молока с использованием кефирных грибов. Кефирный грибок сам по себе является носителем микробиоты, в которой преобладают молочнокислые бактерии, при этом один или несколько видов молочнокислых бактерий составляют подавляющее большинство сообщества, а дрожжи присутствуют в меньшем количестве (Kalamaki & Angelidis, 2020; González-Orozco et al., 2023). Полученные нами результаты согласуются с результатами предыдущих исследований кефирных грибов: микробное сообщество лиофилизированных образцов характеризовалось выраженным преобладанием представителей рода *Lactobacillus*, прежде всего *L. kefiranofaciens* и *L. helveticus*. Дрожжевой компонент составлял 1,29% и был представлен *K. marxianus*. В исследовании González-Orozco et al. (2023) доля эукариотической составляющей была сопоставимой (0,9%), однако включала три вида — *K. marxianus*, *K. africana* и *N. dairenensis*.

L. kefiranofaciens является ключевым структурообразующим компонентом, ответственным за синтез экзополисахарида кефирана и формирование полисахаридного матрикса зёрен. Данный вид обнаруживается в большинстве описанных кефирных грибов по всему миру, включая азиатские, европейские и южноамериканские образцы (Luo, et al., 2023; Tingirikari, J.M.R., et al., 2024; McGovern et al., 2024; Ströher, et al., 2025). Его присутствие в изученных культурах кефирных грибов может свидетельствовать о едином происхождении симбиотического сообщества. Вторым по численности видом в микробиоте кефирных грибов являлся *L. helveticus*, что согласуется с данными других исследований, где данный таксон описывается как типичный представитель микробного ядра кефирных грибов (McGovern et al., 2024). *L. helveticus* принимает участие в гомоферментативном молочнокислом брожении, сопровождающемся интенсивным образованием молочной кислоты и быстрым снижением pH. По литературным данным, данный вид обладает более высокой кислотогенной активностью по сравнению с *Lactobacillus bulgaricus* и *St. thermophilus* (Warakaulle et al., 2025), что обусловлено его эффективным метаболизмом лактозы, обеспечивающим ускоренное подкисление среды и рост титруемой кислотности. Кроме того, данный вид обладает выраженной протеолитической активностью, обеспе-

чивающей расщепление молочных белков и образование аминокислот и пептидов, используемых другими участниками сообщества в качестве источников азота и факторов роста. Предположительно, *L. helveticus* в исследуемых нами кефирных грибах вносит наибольший вклад в формирование белковой составляющей их матрикса. На ранних стадиях ферментации его численность возрастает, что, вероятно, связано с активным протеолизом и участием в формировании сгустка. Вероятно, после образования плотной коагуляционной структуры *L. helveticus* переходит в состояние низкой метаболической активности, что обусловлено истощением белковых субстратов и снижением pH до неблагоприятных значений. Оптимальный диапазон роста *L. helveticus* составляет pH 5,5–5,8 (Zhao et al., 2024), тогда как при pH < 4.5 может наблюдаться угнетение его роста (Guron et al., 2023).

Сохранение высокой численности *L. helveticus* как в структуре кефирных зёрен, так и в закваске согласуется с данными других исследований (McGovern et al., 2024) и указывает на устойчивую вовлеченность данного вида в симбиотический консорциум. Его присутствие в обеих фазах — прикрепленной (кефирные грибки) и планктонной (жидкой) — отражает экологическую пластичность *L. helveticus* и способность адаптироваться к различным микросредам в процессе ферментации. Помимо *L. helveticus*, в «планктонной» заквасочной микробиоте, т.е. после удаления кефирных грибов из жидкой фракции и получения закваски, обнаруживаются *L. cremoris* и *L. lactis*, при этом обнаруживается и немногочисленный *L. kefiranofaciens*.

Постепенно рост *L. helveticus* угнетается, уступая место более кислотоустойчивым видам — *L. cremoris* и *L. lactis*, которые способны сохранять метаболическую активность при снижении pH до ≈ 4.7 –5.0 (Carvalho, 2013). Такая перестройка согласуется с данными других исследований, где на поздних стадиях ферментации наблюдается переход от доминирования палочковидных лактобацилл к кокковым формам, адаптированным к повышенной кислотности (Alraddadi, 2022). Микробное сообщество готового кефира также характеризуется доминированием *L. cremoris* и *L. lactis*, что согласуется с их пиковым развитием на поздних стадиях активной ферментации.

После формирования сгустка продукт помещается в холодильную камеру при +4 °C, и именно эти мезофильные, но сравнительно холодоустойчивые виды сохраняют численность и метаболическую активность в условиях

пониженной температуры (Dimitreli et al., 2025), в то время как рост термофильных и менее адаптированных таксонов, таких как *L. helveticus* и *L. kefiranofaciens*, угнетается. Во время хранения при +4°C (от 7 до 21 суток) фиксируется наличие — *L. acidophilus*, что указывает на его участие в поздних стадиях созревания, где данный вид метаболизирует остаточные углеводы и способствуя формированию органолептического профиля продукта. Подавленный рост термофильных видов и сохранение метаболической активности мезофильных представителей обеспечивает протекание постферментационных процессов (созревание и стабилизацию аромата). Данный вид известен своей способностью к выживанию в кислой среде, богатой продуктами первичного метаболизма и пептидами, образованными в ходе протеолиза (Gao et al., 2022). Его всплеск на завершающем этапе ферментации может быть связан со снижением конкурентного давления со стороны быстрорастущих лактококков и с переходом сообщества к фазе вторичных метаболических взаимодействий, направленных на переработку остаточных субстратов. *L. acidophilus* в этих условиях может вносить вклад в постферментационное «дозревание» кефира, участвуя в формировании органолептических характеристик продукта за счёт синтеза органических кислот и летучих соединений (Gao et al., 2022).

Анализ β -разнообразия выявил выраженную пространственно-функциональную дифференциацию между «структурным ядром» зёрен и «планктонной» фазой на начальном этапе активной ферментации. Такая дихотомия отражает фундаментальные различия между прикреплённой и свободноживущей микробиотой: первая представляет собой устойчивое симбиотическое ядро, поддерживающее стабильный состав ключевых таксонов, тогда как вторая характеризуется высокой динамичностью и быстрой сменой доминирующих видов в ответ на изменение условий среды. В то же время минимальные различия между микробными сообществами на 14-е и 21-е сутки ферментации свидетельствуют о достижении так называемого «экологического плато» — состояния относительного равновесия, при котором сообщество зрелого напитка стабилизируется и дальнейшие сукцессионные сдвиги минимальны.

Полученные данные согласуются с представлением о грибах как об устойчивом доноре микробного потока, обеспечивающем заселение жидкой фазы микроорганизмами, в то время как сама жидкая фаза является динамич-

ной средой, в которой происходят последовательные сукцессионные изменения в ответ на метаболическую активность микробов (Biçer et al., 2025). Эту динамику формируют сами микроорганизмы, чья метаболическая активность последовательно изменяет параметры среды — pH, состав и доступность субстратов, концентрацию метаболитов и сигнальных молекул. Эти изменения, в свою очередь, определяют дальнейшую сукцессию: так, виды, активно растущие на ранних этапах, истощают доступные ресурсы и создают новые ниши, благоприятные для роста других участников сообщества.

Ограничения исследования

Настоящее исследование было ограничено анализом микробной динамики в пределах одного типа кефирных грибов и на основе лабораторно контролируемого процесса ферментации. Полученные данные могут не полностью отражать вариабельность микробного состава кефира, получаемого с использованием других штаммов грибов, различных молочных сырьевых материалов или промышленных технологий ферментации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование позволило охарактеризовать сукцессионные процессы, происходящие в микробных сообществах при ферментации молока с использованием кефирных грибов. Установлено, что кефирные грибки выступают как устойчивый источник микробиоты, обеспечивающий формирование сбалансированного симбиотического сообщества в жидкой фазе. Полученные данные не только уточняют представления о механизмах микробной сукцессии в ферментированных системах, но и демонстрируют потенциал кефирных грибов в качестве модели естественного симбиотического биоценоза. Практическая значимость работы заключается в возможности использования выявленных закономерностей для оптимизации биотехнологических параметров ферментации, разработки стандартизированных заквасок и прогнозирования стабильности качества кисломолочных продуктов. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение межвидовых взаимодействий и метаболической кооперации микроорганизмов кефирных грибов с применением метатранскриптомного и метаболомного анализа, что позволит глубже понять принципы устойчивости и самоорганизации симбиотических микробных систем.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Коваль Дарья Дмитриевна: разработка концепции; формальный анализ; проведение исследования; визуализация; написание черновика рукописи.

Ратайчук Виктор Александрович: формальный анализ; визуализация.

Хан Алексей Владимирович: проведение исследования; написание рукописи –рецензирование и редактирование.

Лазарева Екатерина Германовна: проведение исследования; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Фоменко Олег Юрьевич: разработка концепции; формальный анализ; написание рукописи –рецензирование и редактирование; научное руководство.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Koval Daria Dmitrievna: conceptualization; formal analysis; investigation; visualization; writing — original draft preparation.

Rataichuk Viktor Aleksandrovich: formal analysis; visualization.

Khan Alexey Vladimirovich: investigation; writing — review & editing.

Lazareva Ekaterina Germanovna: investigation; writing — review & editing.

Fomenko Oleg Yurievich: conceptualization; formal analysis; writing — review & editing; supervision.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дин Фань, Стоянова Л. Г., & Нетрусов А. И. (2022). Микробиом и метаболитические свойства кефирных зерен и кефира на их основе. *Микробиология*, 91(4), 391–409. <https://doi.org/10.31857/S0026365622100214>
- Abdalla, A. K., Ayyash, M. M., Olaimat, A. N., Osaili TM, Al-Nabulsi, A.A., Shah, N.P., & Holley, R.I. (2021). Exopolysaccharides as antimicrobial agents: Mechanism and spectrum of activity. *Frontiers in Microbiology*, 12, 664395. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.664395>
- Alraddadi, F., Ross, T., & Powell, S. (2022). Evaluation of the microbial communities in kefir grains and kefir over time. *International Dairy Journal*, 136, 105490. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105490>
- Avila-Reyes, S. V., Márquez-Morales, C. E., Moreno-León, G. R., Jiménez-Aparicio, A. R., Arenas-Ocampo, M. L., Solorza-Feria, J., García-Armenta, E., & Villalobos-Espinosa, J. C. (2022). Comparative analysis of fermentation conditions on the increase of biomass and morphology of milk kefir grains. *Applied Sciences*, 12(5), 2459. <https://doi.org/10.3390/app12052459>
- Baars, T., van Esch, B., van Ooijen, L., Zhang, Z., Dekker, P., Boeren, S., et al. (2023). Raw milk kefir: Microbiota, bioactive peptides, and immune modulation. *Food & Function*, 14(2), 1000–1017. <https://doi.org/10.1039/D2FO03248A>
- Biçer, Y., Telli, A. E., Turkal, G., Telli, N., & Uçar, G. (2025). From raw to fermented: Uncovering the microbial wealth of dairy. *Fermentation*, 11(10), 552. <https://doi.org/10.3390/fermentation11100552>
- Blasche, S., Kim, Y., Mars, R. A. T., Machado, D., Maansson, M., Kafkia, E., et al. (2021). Metabolic cooperation and spatiotemporal niche partitioning in a kefir microbial community. *Nature Microbiology*, 6(2), 196–208. <https://doi.org/10.1038/s41564-020-00816-5>
- Breitwieser, F. P., & Salzberg, S. L. (2019). Pavian: Interactive analysis of metagenomics data for microbiome studies and pathogen identification. *Bioinformatics*, 35(20), 4180–4182. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz715>

- Dimitreli, G., Exarhopoulos, S., Apidopoulou, P., Groztidou, O., Georgiou, D., Kalogianni, E. P., & Goulas, A. (2025). Effect of final fermentation pH and pre-drying storage temperature on properties of kefir powder produced by kefir grains. *Applied Sciences*, 15(5), 2509. <https://doi.org/10.3390/app15052509>
- Ding, F., Krasilnikova, A. A., Leontieva, M. R., Stoyanova, L. G., & Netrusov, A. I. (2022). Analysis of kefir grains from different regions of the planet using high-throughput sequencing. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, 77(4), 286–291. <https://doi.org/10.3103/S0096392522040010>
- Dong, X., Shu, G., Kang, J., Zhang, Q., Ma, L., Zhang, M., Chen, H., & Wan, H. (2022). Microbial diversity of six commercially available kefir grains. *Acta Universitatis Cibiniensis. Series E: Food Technology*, 26, 287–292. <https://doi.org/10.2478/auft-2022-0023>
- Encinas-Vazquez, I. A., Carrillo-Pérez, E., Martín-García, A. R., Del-Toro-Sánchez, C. L., Márquez-Ríos, E., Bastarrachea, L. J., & Rodríguez-Figueroa, J. C. (2023). Effects of high-intensity ultrasound pretreatment on the exopolysaccharide concentration and biomass increase in cheese whey kefir. *Processes*, 11(7), 1905. <https://doi.org/10.3390/pr11071905>
- Gao, H., Li, X., Chen, X., Hai, D., Wei, C., Zhang, L., & Li, P. (2022). The functional roles of *Lactobacillus acidophilus* in different physiological and pathological processes. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(10), 1226–1233. <https://doi.org/10.4014/jmb.2205.05041>
- González-Orozco, B. D., García-Cano, I., Escobar-Zepeda, A., Jiménez-Flores, R., & Álvarez, V. B. (2023). Metagenomic analysis and antibacterial activity of kefir microorganisms. *Journal of Food Science*, 88(7), 2933–2949. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16614>
- Guron, G. K. P., Chelladurai, K., et al. (2023). Differential behavior of *Lactobacillus helveticus* B1929 and ATCC 15009 during milk fermentations. *Journal of Dairy Science*, 106(7), 4502–4515. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22769>
- Kalamaki, M. S., & Angelidis, A. S. (2020). High-throughput, sequence-based analysis of the microbiota of Greek kefir grains from two geographic regions. *Food Technology and Biotechnology*, 58(2), 138–146. <https://doi.org/10.17113/ftb.58.02.20.6581>
- Kotova, I. B., Cherdynseva, T. A., & Netrusov, A. I. (2016). Russian kefir grains microbial composition and its changes during production process. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 932, 93–121. https://doi.org/10.1007/5584_2016_2
- Laureys, D., & De Vuyst, L. (2014). Microbial species diversity, community dynamics, and metabolite kinetics of water kefir fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(8), 2564–2572. <https://doi.org/10.1128/AEM.03978-13>
- Lu, J., Breitwieser, F. P., Thielen, P., & Salzberg, S. L. (2017). Bracken: Estimating species abundance in metagenomics data. *PeerJ Computer Science*, 3, e104. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.104>
- Lu, J., Rincon, N., Wood, D. E., Breitwieser, F. P., Pockrandt, C., Langmead, B., Salzberg, S. L., & Steinegger, M. (2022). Metagenome analysis using the Kraken software suite. *Nature Protocols*, 18(2), 423–445. <https://doi.org/10.1038/s41596-022-00738-y>
- Luo, J., Liu, S., Lu, H., Chen, Q., & Shi, Y. (2023). Microbial community variations and bioconversion improvements during soybean-based fermentation by kefir grains. *Foods*, 12(8), 1588. <https://doi.org/10.3390/foods12081588>
- Marshall, V. M., Cole, W. M., & Brooker, B. E. (1984). Observations on the structure of kefir grains and the distribution of the microflora. *Journal of Applied Bacteriology*, 57(3), 491–497.
- Martin, M. (2011). Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. *EMBnet journal*, 17(1), 10–12. <https://doi.org/10.14806/ej.17.1.200>
- McGovern, C. J., González-Orozco, B. D., & Jiménez-Flores, R. (2024). Evaluation of kefir grain microbiota, grain viability, and bioactivity from fermenting dairy processing by-products. *Journal of Dairy Science*, 107(7), 4259–4276. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24364>
- Powell, J. E., Witthuhn, R. C., Todorov, S. D., & Dicks, L. M. T. (2007). Characterization of bacteriocin ST8KF produced by a kefir isolate *Lactobacillus plantarum* ST8KF. *International Dairy Journal*, 17(3), 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2006.02.012>

- Plessas, S., Nouska, C., Mantzourani, I., Kourkoutas, Y., Alexopoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2017). Microbiological exploration of different types of kefir grains. *Fermentation*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.3390/fermentation3010001>
- Prado, M. R., Blandón, L. M., Vandenberghe, L. P., Rodrigues, C., Castro, G. R., Thomaz-Soccol, V., & Soccol, C. R. (2015). Milk kefir: Composition, microbial cultures, biological activities, and related products. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1177. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01177>
- Saleem, K., Ikram, S., Saeed, F., Afzaal, M., Ateeq, H., Hussain, M., Raza, A., Rasheed, A., Asghar, A., & Shah, M.A. (2023). Nutritional and functional properties of kefir: Review. *International Journal of Food Properties*, 26, e2280437. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2280437>
- Ströher, J. A., Oliveira, W. d. C., de Freitas, A. S., Salazar, M. M., da Silva, L. d. F. F., Bresciani, L., Flôres, S. H., & Malheiros, P. d. S. (2025). A global review of geographical diversity of kefir microbiome. *Fermentation*, 11(3), 150. <https://doi.org/10.3390/fermentation11030150>
- Tingirikari, J. M. R., Sharma, A., & Lee, H. J. (2024). Kefir: A fermented plethora of symbiotic microbiome and health. *Journal of Ethnic Foods*, 11, 35. <https://doi.org/10.1186/s42779-024-00252-4>
- Walsh, L. H., Coakley, M., Walsh, A. M., Crispie, F., O'Toole, P. W., & Cotter, P. D. (2023). Analysis of the milk kefir pan-metagenome reveals four community types, core species, and associated metabolic pathways. *iScience*, 26(10), 108004. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108004>
- Warakulle, S., Ayyash, M. M., & Kamal-Eldin, A. (2025). Profiling protein hydrolysis and amino acid metabolism in camel and bovine milk fermented by *Lactobacillus helveticus*, *L. bulgaricus*, and *Streptococcus thermophilus*. *Scientific Reports*, 15(1), 18371. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02944-6>
- Wood, D. E., Lu, J., & Langmead, B. (2019). Improved metagenomic analysis with Kraken 2. *Genome Biology*, 20, 257. <https://doi.org/10.1186/s13059-019-1891-0>
- Zhao, J., Zeng, X., Xi, Y., & Li, J. (2024). Recent advances in the applications of *Lactobacillus helveticus* in the fermentation of plant-based beverages: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 147, 104427. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104427>

REFERENCES

- Abdalla, A. K., Ayyash, M. M., Olaimat, A. N., Osaili TM, Al-Nabulsi, A.A., Shah, N.P., & Holley, R.I. (2021). Exopolysaccharides as antimicrobial agents: Mechanism and spectrum of activity. *Frontiers in Microbiology*, 12, 664395. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.664395>
- Alraddadi, F., Ross, T., & Powell, S. (2022). Evaluation of the microbial communities in kefir grains and kefir over time. *International Dairy Journal*, 136, 105490. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105490>
- Avila-Reyes, S. V., Márquez-Morales, C. E., Moreno-León, G. R., Jiménez-Aparicio, A. R., Arenas-Ocampo, M. L., Solorza-Feria, J., García-Armenta, E., & Villalobos-Espinosa, J. C. (2022). Comparative analysis of fermentation conditions on the increase of biomass and morphology of milk kefir grains. *Applied Sciences*, 12(5), 2459. <https://doi.org/10.3390/app12052459>
- Baars, T., van Esch, B., van Ooijen, L., Zhang, Z., Dekker, P., Boeren, S., et al. (2023). Raw milk kefir: Microbiota, bioactive peptides, and immune modulation. *Food & Function*, 14(2), 1000–1017. <https://doi.org/10.1039/D2FO03248A>
- Bıçer, Y., Telli, A. E., Turkal, G., Telli, N., & Uçar, G. (2025). From raw to fermented: Uncovering the microbial wealth of dairy. *Fermentation*, 11(10), 552. <https://doi.org/10.3390/fermentation11100552>
- Blasche, S., Kim, Y., Mars, R. A. T., Machado, D., Maansson, M., Kafkia, E., et al. (2021). Metabolic cooperation and spatiotemporal niche partitioning in a kefir microbial community. *Nature Microbiology*, 6(2), 196–208. <https://doi.org/10.1038/s41564-020-00816-5>
- Breitwieser, F. P., & Salzberg, S. L. (2019). Pavian: Interactive analysis of metagenomics data for microbiome studies and pathogen identification. *Bioinformatics*, 35(20), 4180–4182. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz715>

- Dimitreli, G., Exarhopoulos, S., Apidopoulou, P., Groztidou, O., Georgiou, D., Kalogianni, E. P., & Goulas, A. (2025). Effect of final fermentation pH and pre-drying storage temperature on properties of kefir powder produced by kefir grains. *Applied Sciences*, 15(5), 2509. <https://doi.org/10.3390/app15052509>
- Ding, F., Krasilnikova, A. A., Leontieva, M. R., Stoyanova, L. G., & Netrusov, A. I. (2022). Analysis of kefir grains from different regions of the planet using high-throughput sequencing. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, 77(4), 286–291. <https://doi.org/10.3103/S0096392522040010>
- Ding, F., Stoyanova, L. G., & Netrusov, A. I. (2022). Microbiome and metabiotic properties of kefir grains and kefir based on them. *Microbiology*, 91(4), 339–355. <https://doi.org/10.1134/S0026261722100885>
- Dong, X., Shu, G., Kang, J., Zhang, Q., Ma, L., Zhang, M., Chen, H., & Wan, H. (2022). Microbial diversity of six commercially available kefir grains. *Acta Universitatis Cibiniensis. Series E: Food Technology*, 26, 287–292. <https://doi.org/10.2478/auaft-2022-0023>
- Encinas-Vazquez, I. A., Carrillo-Pérez, E., Martín-García, A. R., Del-Toro-Sánchez, C. L., Márquez-Ríos, E., Bastarrachea, L. J., & Rodríguez-Figueroa, J. C. (2023). Effects of high-intensity ultrasound pretreatment on the exopolysaccharide concentration and biomass increase in cheese whey kefir. *Processes*, 11(7), 1905. <https://doi.org/10.3390/pr11071905>
- Gao, H., Li, X., Chen, X., Hai, D., Wei, C., Zhang, L., & Li, P. (2022). The functional roles of *Lactobacillus acidophilus* in different physiological and pathological processes. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(10), 1226–1233. <https://doi.org/10.4014/jmb.2205.05041>
- González-Orozco, B. D., García-Cano, I., Escobar-Zepeda, A., Jiménez-Flores, R., & Álvarez, V. B. (2023). Metagenomic analysis and antibacterial activity of kefir microorganisms. *Journal of Food Science*, 88(7), 2933–2949. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16614>
- Guron, G. K. P., Chelladurai, K., et al. (2023). Differential behavior of *Lactobacillus helveticus* B1929 and ATCC 15009 during milk fermentations. *Journal of Dairy Science*, 106(7), 4502–4515. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22769>
- Kalamaki, M. S., & Angelidis, A. S. (2020). High-throughput, sequence-based analysis of the microbiota of Greek kefir grains from two geographic regions. *Food Technology and Biotechnology*, 58(2), 138–146. <https://doi.org/10.17113/ftb.58.02.20.6581>
- Kotova, I. B., Cherdyntseva, T. A., & Netrusov, A. I. (2016). Russian kefir grains microbial composition and its changes during production process. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 932, 93–121. https://doi.org/10.1007/5584_2016_2
- Laureys, D., & De Vuyst, L. (2014). Microbial species diversity, community dynamics, and metabolite kinetics of water kefir fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(8), 2564–2572. <https://doi.org/10.1128/AEM.03978-13>
- Lu, J., Breitwieser, F. P., Thielen, P., & Salzberg, S. L. (2017). Bracken: Estimating species abundance in metagenomics data. *PeerJ Computer Science*, 3, e104. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.104>
- Lu, J., Rincon, N., Wood, D. E., Breitwieser, F. P., Pockrandt, C., Langmead, B., Salzberg, S. L., & Steinegger, M. (2022). Metagenome analysis using the Kraken software suite. *Nature Protocols*, 18(2), 423–445. <https://doi.org/10.1038/s41596-022-00738-y>
- Luo, J., Liu, S., Lu, H., Chen, Q., & Shi, Y. (2023). Microbial community variations and bioconversion improvements during soybean-based fermentation by kefir grains. *Foods*, 12(8), 1588. <https://doi.org/10.3390/foods12081588>
- Marshall, V. M., Cole, W. M., & Brooker, B. E. (1984). Observations on the structure of kefir grains and the distribution of the microflora. *Journal of Applied Bacteriology*, 57(3), 491–497.
- Martin, M. (2011). Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. *EMBnet:journal*, 17(1), 10–12. <https://doi.org/10.14806/ej.17.1.200>
- McGovern, C. J., González-Orozco, B. D., & Jiménez-Flores, R. (2024). Evaluation of kefir grain microbiota, grain viability, and bioactivity from fermenting dairy processing by-products. *Journal of Dairy Science*, 107(7), 4259–4276. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24364>

- Powell, J. E., Witthuhn, R. C., Todorov, S. D., & Dicks, L. M. T. (2007). Characterization of bacteriocin ST8KF produced by a kefir isolate *Lactobacillus plantarum* ST8KF. *International Dairy Journal*, 17(3), 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2006.02.012>
- Plessas, S., Nouska, C., Mantzourani, I., Kourkoutas, Y., Alexopoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2017). Microbiological Exploration of Different Types of Kefir Grains. *Fermentation*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.3390/fermentation3010001>
- Prado, M. R., Blandón, L. M., Vandenberghe, L. P., Rodrigues, C., Castro, G. R., Thomaz-Soccol, V., & Soccol, C. R. (2015). Milk kefir: Composition, microbial cultures, biological activities, and related products. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1177. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01177>
- Saleem, K., Ikram, S., Saeed, F., Afzaal, M., Ateeq, H., Hussain, M., Raza, A., Rasheed, A., Asghar, A., & Shah, M.A. (2023). Nutritional and functional properties of kefir: Review. *International Journal of Food Properties*, 26, e2280437. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2280437>
- Ströher, J. A., Oliveira, W. d. C., de Freitas, A. S., Salazar, M. M., da Silva, L. d. F. F., Bresciani, L., Flôres, S. H., & Malheiros, P. d. S. (2025). A global review of geographical diversity of kefir microbiome. *Fermentation*, 11(3), 150. <https://doi.org/10.3390/fermentation11030150>
- Tingirikari, J. M. R., Sharma, A., & Lee, H. J. (2024). Kefir: A fermented plethora of symbiotic microbiome and health. *Journal of Ethnic Foods*, 11, 35. <https://doi.org/10.1186/s42779-024-00252-4>
- Walsh, L. H., Coakley, M., Walsh, A. M., Crispie, F., O'Toole, P. W., & Cotter, P. D. (2023). Analysis of the milk kefir pan-metagenome reveals four community types, core species, and associated metabolic pathways. *iScience*, 26(10), 108004. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108004>
- Warakaulle, S., Ayyash, M. M., & Kamal-Eldin, A. (2025). Profiling protein hydrolysis and amino acid metabolism in camel and bovine milk fermented by *Lactobacillus helveticus*, *L. bulgaricus*, and *Streptococcus thermophilus*. *Scientific Reports*, 15(1), 18371. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02944-6>
- Wood, D. E., Lu, J., & Langmead, B. (2019). Improved metagenomic analysis with Kraken 2. *Genome Biology*, 20, 257. <https://doi.org/10.1186/s13059-019-1891-0>
- Zhao, J., Zeng, X., Xi, Y., & Li, J. (2024). Recent advances in the applications of *Lactobacillus helveticus* in the fermentation of plant-based beverages: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 147, 104427. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104427>

ОБ АВТОРАХ

Коваль Дарья Дмитриевна, младший научный сотрудник лаборатории прикладной микробиологии и геномики микроорганизмов Федерального государственного автономного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, ул. Люсиновская, 35, 7), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1491-7423>, SPIN-код: 2698-1652, d_koval@vnimi.org

Ратайчук Виктор Александрович, аспирант лаборатории прикладной микробиологии и геномики микроорганизмов Федерального государственного автономного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, ул. Люсиновская, 35, 7), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0153-8756>, SPIN-код: 4255-6098, vrataychuk@gmail.com

Хан Алексей Владимирович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории прикладной микробиологии и геномики микроорганизмов Федерального государственного автономного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, ул. Люсиновская, 35, 7), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6106-6088>, SPIN-код: 1235-9645, a_khan@vnimi.org

Лазарева Екатерина Германовна, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории прикладной микробиологии и геномики микроорганизмов Федерального государственного автономного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, ул. Люсиновская, 35, 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8069-9661>, Scopus ID: 57212864480, Researcher ID: AAG-3173-2020, SPIN-код: 4159-8123, e_lazareva@vnimi.org

Фоменко Олег Юрьевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лаборатории прикладной микробиологии и геномики микроорганизмов Федерального государственного автономного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, ул. Люсиновская, 35, 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7852-3790>, Scopus ID: 21933831600, Researcher ID: G-4792-2015, SPIN-код: 6833-5707, o_fomenko@vnimi.org

ABOUT THE AUTHORS

Koval Daria Dmitrievna, Junior Researcher of the Laboratory of Applied Microbiology and Microbial Genomics, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya Street, 35, 7), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1491-7423>, SPIN-code: 2698-1652, d_koval@vnimi.org

Rataichuk Viktor Aleksandrovich, Postgraduate Student of the Laboratory of Applied Microbiology and Microbial Genomics, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya Street, 35, 7), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0153-8756>, SPIN-code: 4255-6098, vrataychuk@gmail.com

Khan Alexey Vladimirovich, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher of the Laboratory of Applied Microbiology and Microbial Genomics, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya Street, 35, 7), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6106-6088>, SPIN-code: 1235-9645, a_khan@vnimi.org

Lazareva Ekaterina Germanovna, Cand. Sci. (Eng.), Researcher of the Laboratory of Applied Microbiology and Microbial Genomics, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya Street, 35, 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8069-9661>, Scopus ID: 57212864480, Researcher ID: AAG-3173-2020, SPIN-code: 4159-8123, e_lazareva@vnimi.org

Fomenko Oleg Yurievich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Applied Microbiology and Microbial Genomics, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya Street, 35, 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7852-3790>, Scopus ID: 21933831600, Researcher ID: G-4792-2015, SPIN-code: 6833-5707, o_fomenko@vnimi.org

Неразрушающий экспресс-метод оценки качества какао-бобов

С.Л. Белецкий¹, Н.В. Линовская¹, Н.Н. Потрахов², К.К. Гук²

¹ ВНИИКП — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им В.М. Горбатова» РАН, г. Москва, Российская Федерация

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Семена дерева какао (какао-бобы) являются ценной агротехнической культурой многоцелевого использования. Соблюдение требований к какао-бобам, установленным в контрактах на поставку, а также национальных и межгосударственных стандартах обеспечивает их коммерческую привлекательность. В настоящее время оценка качества какао-бобов является сложным трудоемким процессом, осуществляемым вручную. При этом стандартный метод оценки качества разрушает анализируемую пробу, что влечет за собой утилизацию ценнейшего сырья.

Цель: Разработка экспрессного информативного метода контроля качества семян какао-бобов на основе применения микрофокусной рентгенографии.

Материалы и методы: Для получения рентгеновских изображений какао-бобов использовали многофункциональную передвижную рентгеновскую установку семейства ПРДУ и портативный рентгенограф. Параметры получения микрофокусных рентгеновских снимков: напряжение на рентгеновской трубке 20 кВ, ток 80 мкА, продолжительности экспонирования 2 с. Для исследований использовали какао-бобы пяти сортов: Криолло, Форастеро, Тринитарио, Националь, Самбирано из Колумбии, Венесуэлы, Кот-д'Ивуар, Ганы, Гондураса, Филиппин, Перу, Эквадора и Мадагаскара, урожая 2023 года. Рентгеновские проекции какао-бобов визуально сравнивали со снимками в видимых лучах (эталон) этих же разрезанных какао-бобов (ГОСТ ISO 1114-2014 Какао-бобы. Контроль разрезанием).

Результаты: В работе приведены результаты рентгенографических исследований партий какао-бобов, импортируемых Российской Федерацией из различных стран. В ходе проведенных исследований подобраны оптимальные режимы экспонирования для портативного и стационарного устройств. Установлена зависимость между рентгеновским изображением отдельного какао-боба и параметрами его качества. Выявлено, что морфологические особенности и дефекты семян дерева какао, визуализированные на рентгеновских снимках, имеют высокую долю совпадений и согласуются с визуальными изображениями их срезов. Доказана высокая доля совпадений идентификации дефектов какао-бобов при исследовании матриц рентгеновских изображений, полученных на портативном и стационарном устройствах.

Выводы: Сформованы матрицы визуальных характеристик какао-бобов по месту произрастания и типам дефектов, получены микрофокусные рентгенограммы какао-бобов и их фотографии в видимом свете для сопоставительных оценок, проведена сравнительная оценка рентгенограмм какао-бобов, с использованием лабораторной рентгеновской установке и на портативном рентгенографе. Полученные результаты позволят разработать комплект специализированных технических и программных средств для автоматического контроля качества товарных партий какао-бобов, поступающих в промышленную переработку.

Ключевые слова: какао-бобы; показатели качества; обнаружение дефектов какао-бобов; метод разрезанием; неразрушающий контроль (НК); микрофокусная рентгенография

Корреспонденция:

Сергей Леонидович Белецкий
E-mail: grain-miller@yandex.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 13.09.2025

Принята: 15.12.2025

Опубликована: 30.12.2025

Copyright: © 2025 Авторы



Для цитирования: Белецкий, С.Л., Линовская, Н.В., Потрахов, Н.Н., & Гук, К.К. (2025). Неразрушающий экспресс-метод оценки качества какао-бобов. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 55-72. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.96>

Nondestructive Rapid Method for Assessing Cocoa Bean Quality

Sergey L. Beletskiy¹, Natalya V. Linovskaya¹, Nikolai N. Potrakhov², Karina K. Guk²

¹ All-Russian Research Institute of the Confectionery Industry — Branch of the Federal State Scientific Budgetary Institution V. M. Gorbатов Federal Scientific Center of Food Systems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin), Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Background: Cocoa tree seeds (cocoa beans) represent a high-value agricultural commodity with multiple end uses. Compliance with contractual quality specifications and with national and interstate standards underpins their commercial value. At present, cocoa-bean quality assessment remains a complex and labour-intensive procedure performed largely by manual inspection. Moreover, the standard grading approach is destructive, leading to disposal of the tested sample and, consequently, loss of valuable raw material.

Purpose: To develop a rapid, informative method for cocoa-bean quality control based on microfocus radiography.

Materials and Methods: X-ray images of cocoa beans were obtained using a multifunctional mobile X-ray system of the PRDU family and a portable X-ray unit. Microfocus imaging parameters were: tube voltage 20 kV, tube current 80 μ A, exposure time 2 s. The study examined five cocoa varieties (Criollo, Forastero, Trinitario, Nacional, and Sambirano) originating from Colombia, Venezuela, Côte d'Ivoire, Ghana, Honduras, the Philippines, Peru, Ecuador, and Madagascar (2023 harvest). Radiographic projections were visually compared with visible-light images (reference) of longitudinally cut beans prepared from the same samples in accordance with GOST ISO 1114-2014 (Cocoa beans. Cut test).

Results: The study reports radiographic evaluations of cocoa-bean consignments imported into the Russian Federation from multiple countries. Optimal exposure regimes were established for both the portable device and the laboratory-based system. A relationship was identified between the radiographic appearance of an individual cocoa bean and its quality attributes. Morphological features and defects visualised on radiographs showed a high degree of correspondence with the visible-light images of the respective longitudinal sections. In addition, defect identification based on radiographic image matrices demonstrated a high level of agreement between the portable and stationary imaging platforms.

Conclusion: Matrices of visual characteristics of cocoa beans were compiled by origin and defect type; microfocus radiographs and corresponding visible-light photographs were obtained for comparative assessment; and radiographs acquired with a laboratory X-ray system and a portable unit were systematically compared. The findings provide a methodological basis for developing specialised hardware and software tools to enable automated quality control of commercial cocoa-bean batches intended for industrial processing.

Keywords: cocoa beans; quality indicators; cocoa bean defects; cutting method; non-destructive testing (NDT); microfocus X-ray imaging

Correspondence:

Sergey L. Beletskiy

E-mail: grain-miller@yandex.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 13.09.2025

Accepted: 15.12.2025

Published: 30.12.2025

Copyright: © 2025 The Authors



To cite: Beletskiy, S.L., Linovskaya, N.V., Potrakhov, N.N., & Guk, K.K. (2025). Nondestructive rapid method for assessing cocoa bean quality. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 55-72. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.96>

ВВЕДЕНИЕ

Какао-бобы являются ключевым сырьевым ресурсом мировой шоколадной и кондитерской промышленности и занимают стратегическое место в глобальной системе агропродовольственных цепочек. По объемам производства культура какао превосходит суммарные показатели культивирования всех видов чая. Основными производителями какао-бобов остаются страны Африки, формирующие 72–74 % мирового объема, тогда как на страны Латинской Америки приходится 24–25 %, а на государства Юго-Восточной Азии — около 1–2 %. При этом в последние годы наблюдается устойчивая тенденция к расширению географии возделывания какао в странах Южной и Юго-Восточной Азии, включая Малайзию, Индонезию, Шри-Ланку, Филиппины и Индию, что отражает процессы диверсификации мирового производства (Mougang, 2022; Adet, 2024).

На фоне роста спроса мировой рынок какао-бобов характеризуется выраженной нестабильностью. В 2024 году котировки какао-бобов достигли исторического максимума, превысив 12 000 долл. США за тонну, что связано с глобальным дефицитом сырья. Среди ключевых факторов дефицита выделяются деградация почв плантаций *Theobroma cacao* L., дефицит азота, фосфора и калия, замедляющий переход семян к физиологической зрелости (Weinstein et al., 2025), а также климатические изменения, включающие засухи и повышение кислотности почв. Существенное влияние оказывают и социально-экономические факторы, включая снижение заинтересованности сборщиков какао, валютные колебания и логистические ограничения (Гаврилова, 2024). Дополнительно качество товарных партий существенно зависит от микробиологических процессов, протекающих в ходе транспортирования и хранения какао-бобов (Баженова & Пестерев, 2021).

В условиях роста стоимости и дефицита какао-бобов возрастает значимость объективного и воспроизводимого контроля их качества. В Российской Федерации данная область регламентируется системой национальных и межгосударственных стандартов. Отбор проб осуществляется по ГОСТ ISO 2292-2014 «Какао-бобы. Отбор проб», требования к органолептическим показателям, примесям и вредителям установлены ГОСТ 32615-2014 «Какао-бобы. Технические условия», массовая доля влаги определяется согласно ГОСТ 32616-2014 «Какао-бобы. Определение содержания влаги

(общепринятый метод)», а показатели безопасности контролируются в рамках ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции».

Базовым нормативным методом оценки качества какао-бобов остается ГОСТ ISO 1114-2014 «Какао-бобы. Контроль разрезанием», основанный на визуальной оценке продольных срезов 300 семян из партии. Несмотря на широкое применение, данный метод характеризуется рядом системных ограничений. Он отличается высокой трудоемкостью, низкой производительностью, значительной зависимостью от субъективного фактора эксперта и обеспечивает лишь выборочную оценку партии (Линовская, 2024). Принципиальным недостатком является разрушительный характер контроля, приводящий к утрате значительного объема ценного сырья, что особенно критично в условиях дефицита и высокой рыночной стоимости какао-бобов.

Таким образом, в современной практике контроля качества какао-бобов сохраняется методологическое противоречие между нормативно закрепленными разрушительными методами и потребностью в быстрых, объективных и неразрушающих инструментальных технологиях, обеспечивающих выявление как явных, так и скрытых дефектов семян. Данное противоречие формирует устойчивый научно-практический запрос на внедрение методов неразрушающего контроля, адаптированных к малым биологическим объектам.

Одним из наиболее перспективных направлений в этом контексте является микрофокусная рентгенография, позволяющая получать изображения с высоким пространственным разрешением за счет малого размера фокусного пятна рентгеновской трубки. Использование режимов съемки с напряжением порядка 20 кВ, током 80 мкА и экспозицией 2 с обеспечивает визуализацию внутренней структуры семян на уровне, достаточном для идентификации дефектов, недоступных традиционному визуальному осмотру (Архипов М.В. 2020).

Несмотря на активное развитие микрофокусной рентгенографии в задачах неразрушающего контроля и диагностической визуализации, ее применение в области товарной оценки какао-бобов остается ограничено представленным в научной литературе. В частности, недостаточно разработаны стандартизированные визуальные матрицы рентген-признаков дефектов, а также отсутствуют сопоставительные ис-

следования между стационарными и портативными рентгенографическими системами применительно к какао-сырью. В этой связи настоящая работа направлена на восполнение выявленного методологического и прикладного пробела.

Целью исследования является разработка экспрессного информативного метода контроля качества какао-бобов на основе применения микрофокусной рентгенографии.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- (1) оценить возможность применения микрофокусных рентгеновских установок отечественного производства для выявления скрытых дефектов какао-бобов;
- (2) сформировать матрицы визуальных характеристик какао-бобов с учетом места произрастания и типов дефектов;
- (3) получить микрофокусные рентгенограммы какао-бобов и их изображения в видимом диапазоне для сопоставительного анализа;
- (4) провести сравнительную оценку рентгенограмм, полученных на стационарной лабораторной установке и на портативном рентгенографе.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Рентгенография является одним из методов изучения внутренней структуры объектов исследования, например, в медицине (Королюк, 2017). Этот метод отличается высокой информативностью, простотой и оперативностью в реализации, а главное — является неразрушающим. Однако размеры отдельного какао-боба, а тем более деталей его внутреннего строения принципиально меньше объектов медицинской диагностики. Поэтому широко известный в медицинской диагностике контактный способ рентгеновской съемки, реализуемый на мощных рентгеновских аппаратах с размером фокусного пятна на рентгеновской трубке от 1 мм и более, не позволяет обеспечить качества изображения, достаточного для выявления и описания возможных дефектов какао-бобов.

Для решения данной задачи может быть использован микрофокусный способ получения рентгеновских изображений, которые были ранее протестированы на различных объектах (Архипов, 2025; Платов, 2025; Platov, 2024; Musaev, 2022; Уланин, 2018; Желудков, 2018).

Основным отличием микрофокусного способа съемки от традиционного контактного является уменьшенный до нескольких десятков микрон размер фокусного пятна рентгеновской трубки (точечное фокусное пятно). На Рисунке 1 схематично представлена типовая

Рисунок 1

Типовая конструкция рентгеновской трубки и основные рентгенооптические параметры

Figure 1

Typical Design of an X-ray Tube and Basic X-Ray Optical Parameters

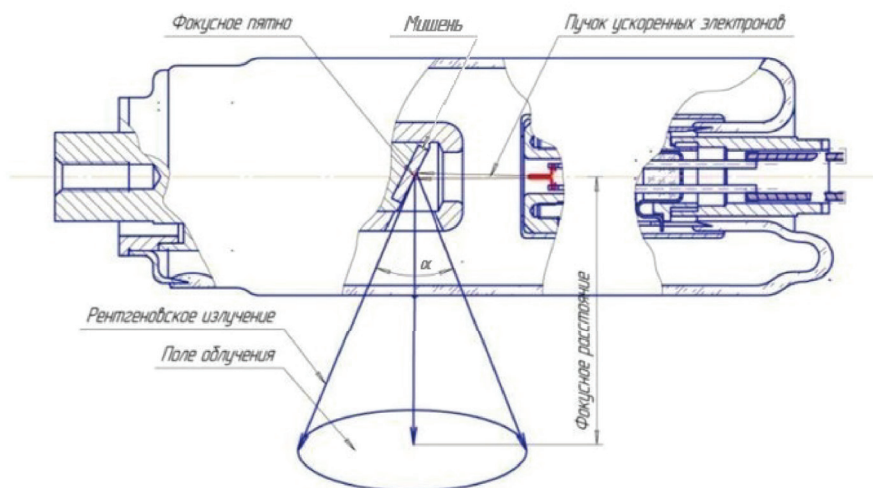
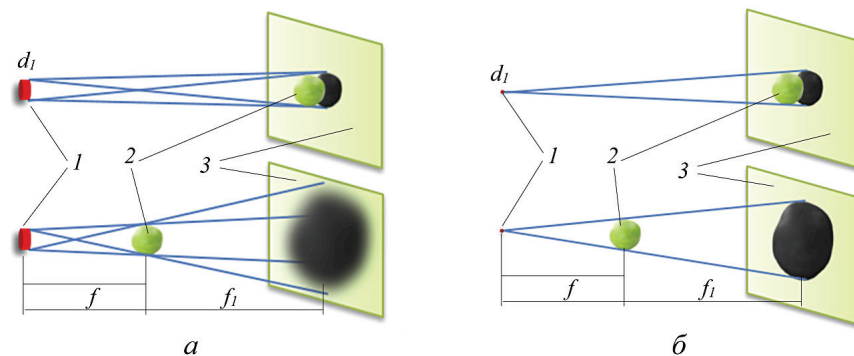


Рисунок 2

Рентгенооптические схемы съемки

Figure 2

X-Ray Optical Imaging Schemes



Примечание. 1 — фокусное пятно d_i , 2 — объект; 3 — изображение объекта; f — расстояния от фокусного пятна до объекта; f_i — фокусное расстояние.

Note. 1 — focal spot d_i , 2 — object; 3 — image of the object; f — distance from the focal spot to the object; f_i — focal length.

конструкция современной рентгеновской трубки и указаны рентгенооптические параметры, величина которых варьируется при съемке (Иванов, 1989).

Основными из этих параметров являются:

- (1) фокусное пятно (участок на мишени анода рентгеновской трубки, на который падает пучок ускоренных электронов и с поверхности которого происходит генерация излучения);
- (2) фокусное расстояние (расстояние от фокусного пятна до объекта рентгеновской съемки);
- (3) поле облучения (участок поверхности приемника рентгеновского изображения, на которую падает поток излучения).

На Рисунке 2 в сравнении показаны рентгенооптические схемы контактного и микрофокусного способов рентгеновской съемки.

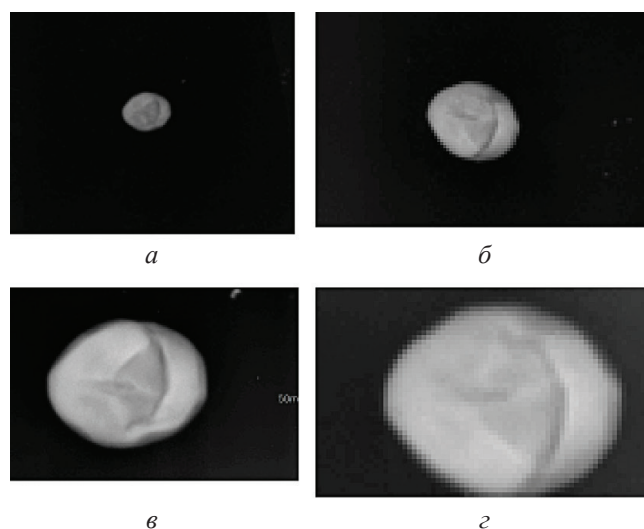
В обоих случаях фокусное пятно d_i (1) располагается на фокусном расстоянии f_i от плоскости приемника изображения (3). Объект рентгеновской съемки (2) размещается в пространстве между ними на расстоянии f от фокусного пятна. При этом соотношение f_i/f определяет коэффициент геометрического увеличения размеров получаемого рентгеновского изображения объекта. Вследствие конечных размеров фокусного пятна (размер d_i около 1 мм), резкое изображение объекта рентгеновской съемки может быть получено только при его контактном размещении на плоскости

Рисунок 3

Рентгеновские снимки тест-объекта (на примере боба гороха), полученные на аппарате с фокусным пятном около 1 мм

Figure 3

X-ray Images of the Test Object (Using the Example of a Pea Bean) Obtained on an Apparatus with a Focal Spot of about 1 mm



Примечание. а — без увеличения изображения; б, в, г — с коэффициентом увеличения изображения m , равным 2, 4, 8 соответственно.

Note. а — without image magnification; б, в, г — with image magnification factor m equal to 2, 4, 8, respectively.

приемника (3). Отсюда следует название этого способа рентгеновской съемки (Рисунок 3). Любое удаление объекта рентгеновской съемки от плоскости изображения с целью увеличения изображения мелких деталей его строения приводит к появлению геометрической нерезкости и, соответственно, к снижению качества получаемого изображения.

В отличие от контактного микрофокусный способ рентгеновской съемки точечным фокусным пятном позволяет получать резкие увеличенные изображения даже на значительном удалении объекта рентгеновской съемки от плоскости приемника (Рисунок 4).

На, так называемых, микрофокусных изображениях по мере роста коэффициента увеличения даже обнаруживаются детали строения объекта, неразличимые при контактной съемке (без увеличения изображения) (Потрахов, 2016). С учетом вышеизложенного, применение микрофокусной рентгенографии имеет широкие перспективы для комплексной оценки органолепти-

ческих показателей какао-бобов и их дефектов, в том числе скрытых. Получение матриц рентгенографических снимков какао-бобов, выращенных на различных территориях как в целом, так и в разрезанном виде, а также их рентгеновских изображений для определения возможности применения метода микрофокусной рентгенографии при оценке качества сырья для производства шоколадной продукции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В качестве образцов для исследований использовали ферментированные какао-бобы урожая 2023 года по 300 штук каждой пробы из 9 партий следующих сортов: Криолло (Колумбия, Венесуэла), Форастеро (Кот-д'Ивуар, Гана), Тринитарио (Гондурас, Филиппины, Перу), Националь (Эквадор), Самбирано (Мадагаскар).

Какао-бобы хранили в лабораторных условиях при температуре $17 \pm 1^\circ\text{C}$ и влажности не более 70% в течение 3 месяцев от поступления образцов до окончания испытаний. Исследуемые образцы какао-бобов не очищались от какаовеллы, подвергались исследованию с оболочкой.

Формирование «модельных матриц»

«Модельные матрицы» (3 × 3) формировались по принципу шахматной доски с вертикальной ориентацией объектов исследований по следующим признакам: выборка какао-бобов по местам произрастания; отборные какао-бобы различных сортов; какао-бобы с различными видами дефектов: тощие, ломаные, проросшие, слипшиеся, с плодовой мякотью. В дальнейшем проводили фотографирование модельных матриц различными способами.

Фотосъемка

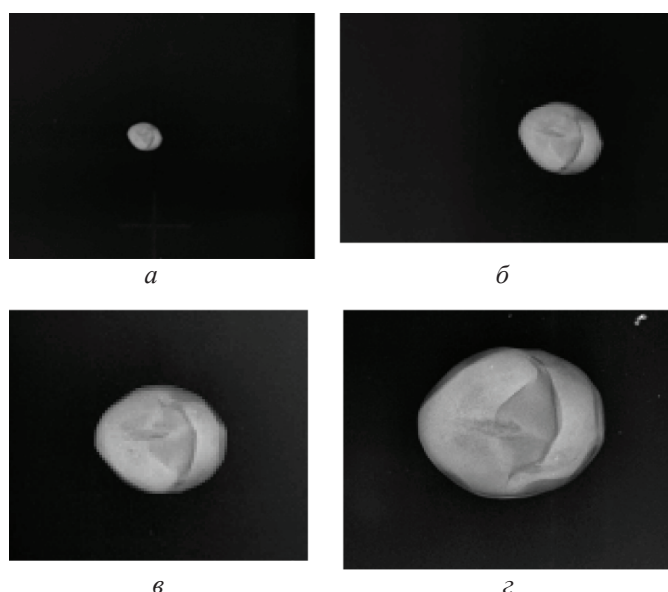
Фотографическую съемку какао-бобов осуществляли цифровым фотоаппаратом Nikon D 850 с объективом Nikon 105mm f/2.8G IF-ED AF-S VR Micro-Nikkor и двумя внешними источниками света. Режим экспонирования: ISO 400, диафрагма 8, свет теплый рассеянный, масштаб 1:1. Расстояние от матрицы фотоаппарата до объекта съемки составляло 500 ± 10 мм, разрешение кадра 45 мп. Снимки какао-бобов получали в трехкратной повторности,

Рисунок 4

Рентгеновские снимки тест-объекта (семя гороха), полученные на аппарате с точечным фокусным пятном

Figure 4

X-ray Images of the Test Object (Pea Seed) Obtained on a Device with a Point Focal Spot



Примечание. А — без увеличения изображения; б, в, г — с коэффициентом увеличения изображения m , равным 2, 4, 8 соответственно.

Note. A — without image magnification; б, в, г — with image magnification factor m equal to 2, 4, 8, respectively.

С.Л. Белецкий, Н.В. Линовская, Н.Н. Потрахов, К.К. Гук

Рентгенография на ПРДУ (стационарная)

Рентгенографические исследования какао-бобов осуществляли способом микрофокусной рентгеновской съемки с применением лабораторного аппаратно-программного комплекса на основе многофункциональной рентгеновской установки семейства ПРДУ (Потрахов, 2017). Внешний вид установки представлен на Рисунке 5. В основе ее конструкции лежит рентгенозащитная камера 1 с дверцей 2 для загрузки объектов рентгенографического исследования. Объекты размещаются на специальном столе 3 с автоматизированным механизмом вертикального перемещения, что позволяет изменять коэффициент увеличения получаемого рентгеновского изображения в широком диапазоне величин. Управление установкой и вывод рентгеновского изображения объекта для предварительного просмотра осуществляется с помощью крупноформатного сенсорного экрана 4. Рентгеновскую съемку какао-бобов проводили с трехкратным увеличением изображения какао-бобов. Режимы съемки: напряжение на рентге-

новской трубке 20 кВ, ток трубки 80 мкА, время экспозиции 2 с. (Рисунок 5).

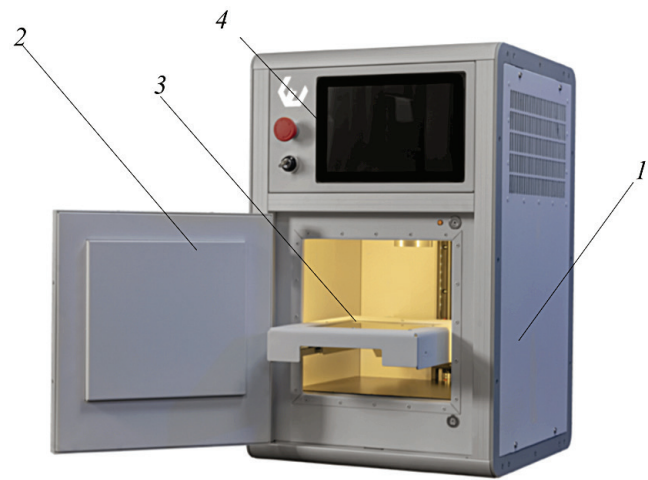
Характеристика детектора и параметры съемки представлены в Таблице 1.

Таблица 1
Характеристика детектора и параметры съемки стационарной установки

Table 1 Detector Characteristics and Imaging Parameters of the Stationary System	
Наименование параметров	Значения параметров
Разрешение получаемых изображений	2400 × 3000 px.
Размер детектора	240 × 300 мм
Формат файлов	bmp
Параметры экспонирования (kV/μA/экспозиция/с)	Являются ноу-хау авторов статьи и равны стандартным параметрам экспонирования для микрофокусных рентгеновских трубок марки БС-2
Расстояние от трубки до объекта	500 мм
Увеличение	3×
Тип детектора,	Магнитная пластина с ионами галлия
Размер пикселя пластины	0,1 мм
Число повторов	четыре

Рисунок 5
Многофункциональная рентгеновская установка семейства ПРДУ

Figure 5
Multifunctional PRDU-Family X-Ray System



Примечание. 1 — рентгенозащитная камера; 2 — дверца для загрузки объектов рентгенографического исследования; 3 — стол для размещения объектов рентгенографического исследования; 4 — крупноформатный сенсорный экран.

Note. 1 — X-ray shielded chamber; 2 — Door for loading X-ray examination objects; 3 — Table for placing X-ray examination objects; 4 — Large-format touchscreen display.

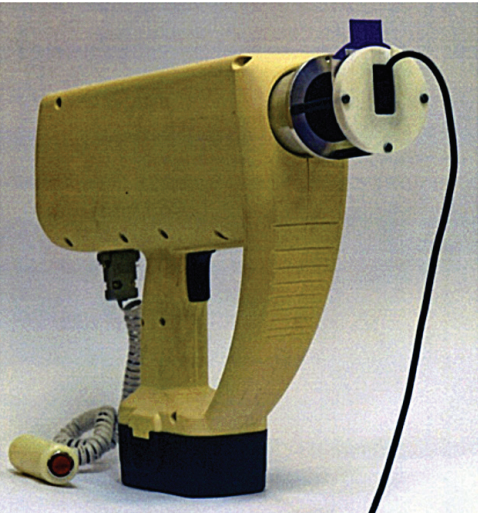
Портативный рентгенограф

В процессе исследований применяли также портативный аппаратно-программный комплекс (рентгенограф), (Рисунок 6). Портативный рентгенограф предназначен для исследований небольших по размерам фрагментов растений, семян и зерна непосредственно вне специализированной лаборатории: в поле, лесу, на предприятии или в складских условиях (Линовская, 2024; Потрахов, 2016; Musaev, 2022; Платов, 2025). В состав комплекса входит первый отечественный микрофокусный аппарат семейства «ПАРДУС» со встроенным аккумуляторным источником питания, ресурса которого хватает для выполнения не менее 60 снимков. Съёмка выполняется с рук без использования дополнительного штатива, для чего корпус прибора снабжён специальной рукояткой. В качестве приёмника изображения используется устройство для визуализации на основе рентгеночувствительного ПЗС-детектора. Размер входного окна детектора (рентгеночувствительной обла-

С.Л. Белецкий, Н.В. Линовская, Н.Н. Потрахов, К.К. Гук

Рисунок 6
Многофункциональная портативная рентгеновская установка семейства ПРДУ

Figure 6
Multifunctional Portable PRDU-Family X-Ray System



сти) составляет примерно 40 × 20 мм. Рентгеновское изображение объекта, зафиксированное детектором в виде цифрового электрического сигнала, подается на компьютер и визуализируется на его экране (Потрахов, 2017).

Характеристика детектора и параметры съемки представления в Таблице 2.

Таблица 2
Характеристика детектора и параметры съемки

Table 2
Detector Characteristics and Imaging Parameters

Наименование параметров	Значения параметров
Разрешение получаемых изображений	240 × 320 px.
Размер детектора	20 × 40 мм
Формат файлов	bmp
Параметры экспонирования (kV/μA/экспозиция/с)	Являются ноу-хау авторов статьи и равны стандартным параметрам экспонирования для микрофокусных рентгеновских трубок марки БС-6
Расстояние от трубки до объекта	60 мм
Увеличение	1× (контактная съемка)
Тип детектора	Пзс-матрица
Размер пикселя пластины	порядка 0,1 мм
Число повторов	девять

Рентгеновские снимки какао-бобов выводили на экран монитора компьютера для анализа изображения и идентификации рентген-признаков дефектов и сравнения со срезами в соответствии со стандартной процедурой по ГОСТ. Сравнению подвергали одни и те же модельные матрицы какао-бобов.

РЕЗУЛЬТАТЫ
Краткие характеристики показателей качества и дефектов какао-бобов

В семенах современных сортов какао (Криолло, Форастеро, Тринитарио, Националь) содержится более 50 % высокоценного жира, а также более 14 % белка, около 4 % клетчатки и 1,5 % теобромина (Ariza Budi Tunjung Sari, 2024; Nelly Ndee Mougang, 2024), соответственно товароведческая классификация какао-бобов по сортам основана на оценке их морфологических особенностей, степени ферментации и зрелости, а также физико-химических показателей.

Различают внешние и внутренние дефекты какао-бобов (Матвеева, 2020). Среди них выделяют тощие, сросшиеся, плесневелые, поврежденные насекомыми, проросшие, разрушенные, недоферментированные, темно-серые (незрелые) и др.

Визуализация дефектов

Для разработки, в последующем, алгоритма автоматического определения дефектов какао-бобов необходимо визуализировать эти дефекты как на фотографиях в видимом свете, так и на рентгеновских снимках. Визуализация дефектных какао-бобов представлена на Рисунке 7.

Какао-бобы наивысшего качества характеризуются чистотой, крупностью, равномерностью коричневой окраски на срезе, недоферментированные семена имеют фиолетовые оттенки (Балыхин, 2019) (Рисунок 8).

Рентгенографический анализ

Для проведения рентгенографического анализа сформировали модельные матрицы какао-бобов с выборками по местам их происхождения и внешним дефектам (Рисунки 9–13).

На модельных матрицах были собраны отборные, ломаные, тощие, слипшиеся, с плодовой мякотью, а также

Рисунок 7

Дефектные какао-бобы

Figure 7

Defective Cocoa Beans



Примечание. а — тощие; б — сросшиеся; в — ломаный, г — плесневелые, д — проросший.

Note. a — shrivelled; b — fused; c — broken; d — moldy; e — sprouted.

Рисунок 8

Характерные особенности какао-бобов

Figure 8

Characteristic Features of Cocoa Beans



Примечание. а — крупный и мелкий; б — идеальные на срезе; в — недо- ферментированные и проросшие на срезе.

Note. a — large and small; b — ideal on the cut surface; c — under-fermented and sprouted on the cut surface.

проросшие какао-бобы. На представленных рентгенограммах отчетливо видны морфологические особенности какао-бобов различных стран произрастания, отборных и дефектных, согласующиеся с визуальной оценкой изучаемого признака.

Сравнение рентгенограмм какао-бобов разных стран произрастания

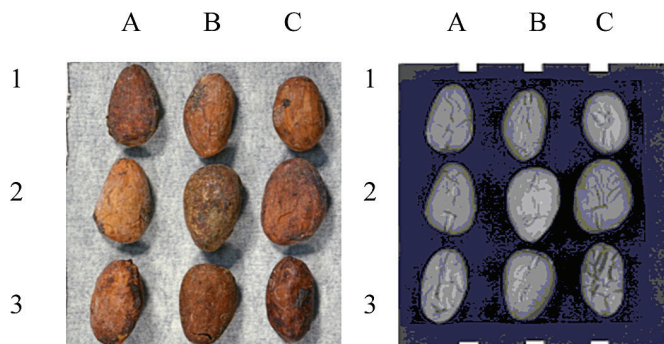
Какао-бобы из различных стран отличаются формой и строением, при этом характеризуются наличием большого количества внутренних каналов, что свидетельствует о слоистости их структуры. Контуры овалов исследуемых семян какао на рентгеновском изображении имеют более темный окрас по сравнению с их ядром,

Рисунок 9

Модельная матрица и рентгенограмма выборки какао-бобов по местам произрастания

Figure 9

Model Matrix and Radiograph of Cocoa Bean Samples by Growing Region



Примечание. А1 — Перу, В1 — Венесуэла, С1 — Эквадор, А2 — Кот-д'Ивуар, В2 — Гондурас, С2 — Колумбия, А3 — Мадагаскар, В3 — Гана, С3 — Филиппины.

Note. A1 — Peru, B1 — Venezuela, C1 — Ecuador, A2 — Côte d'Ivoire, B2 — Honduras, C2 — Colombia, A3 — Madagascar, B3 — Ghana, C3 — The Philippines.

что указывает на наличие оболочки — какаовеллы, которая обладает меньшей плотностью (Рисунок 10а).

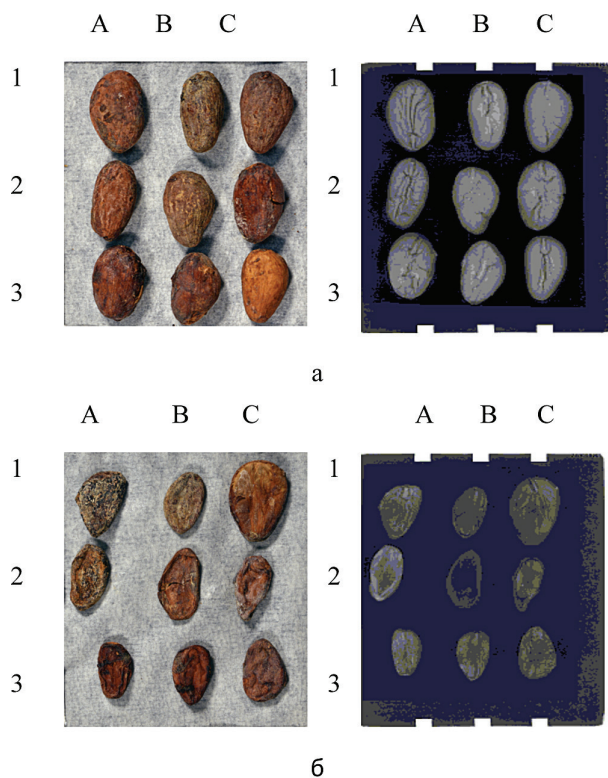
Отличительным признаком эталонных какао-бобов является равномерность распределения оптической плотности их изображения (Рисунок 10 а). Рентгенограмма матрицы с тощими какао-бобами характеризуется меньшей яркостью изображения отдельных семян по сравнению с рентгенограммой отборных семян (Рисунок 10 б).

Рисунок 10а

Модельная матрица и рентгенограмма выборки какао-бобов по местам произрастания

Figure 10a

Model Matrix and Radiograph of Cocoa Bean Samples by Growing Region



Примечание. а — отборных; б — тощих.

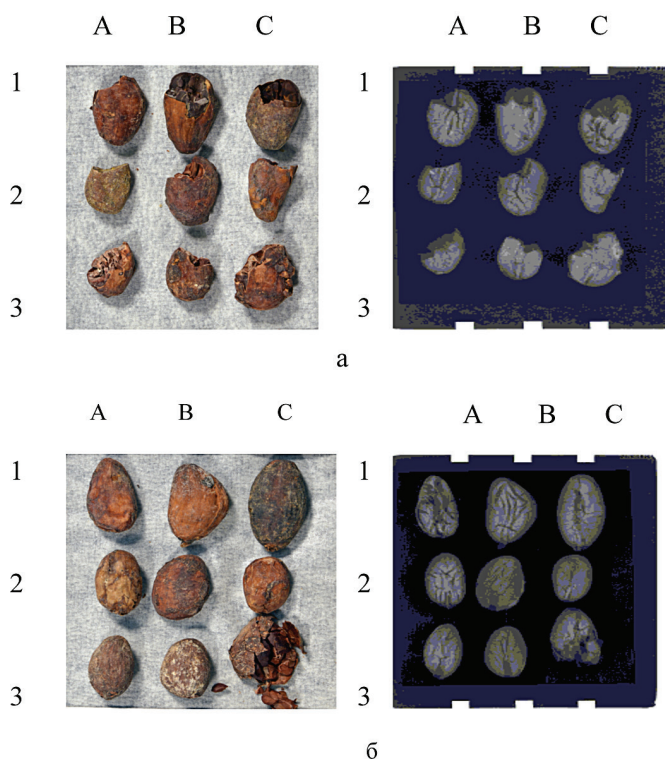
Note. a — selected (sound) beans; б — shrivelled beans.

Рисунок 10 б

Модельная матрица и рентгенограмма какао-бобов

Figure 10b

Model Matrix and Radiograph of Cocoa Beans



Примечание. а — ломаных; б — проросших.

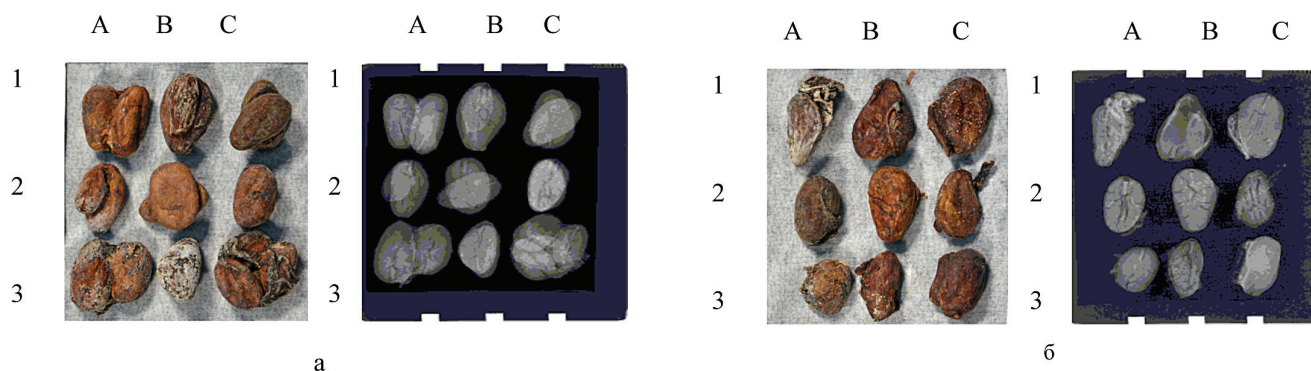
Note. a — broken beans; б — sprouted beans.

Рисунок 11

Модельная матрица и рентгенограмма какао-бобов

Figure 11

Model Matrix and Radiograph of Cocoa Beans



Примечание. а — слипшихся; б — с плодовой мякотью.

Note. a — clumped (stuck-together) beans; б — beans with pulp residues.

Рисунок 12

Фотографии матриц

Figure 12

Photographs of Matrices



Примечание. Целых (а), разрезанных вдоль (б) какао-бобов из Кот-д'Ивуара их рентгенограмма(в).

Note. Whole (a) and longitudinally cut (b) cocoa beans from Côte d'Ivoire, and their radiograph (c).

Рентгеновские изображения ломанных какао-бобов отличаются наличием темных участков неправильной формы. Рентгеновские изображения проросших какао-бобов имеет темные участки зародышевых каналов разной длины.

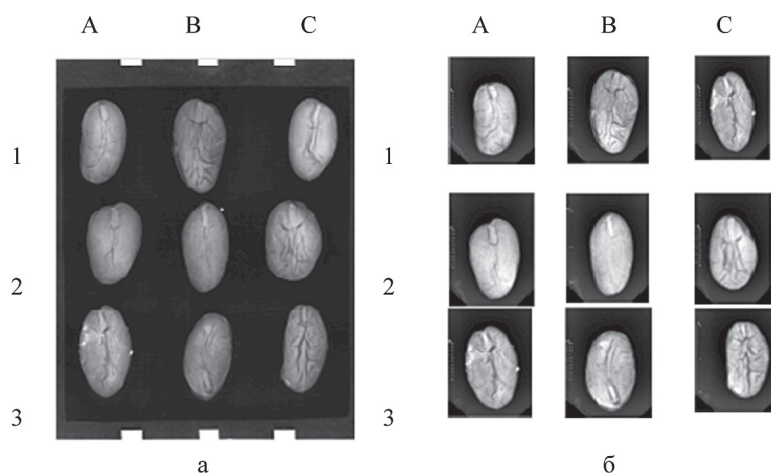
В группе слипшихся и с плодовой мякотью какао-бобов на рентгенограммах визуально обнаруживается их «аномальное» строение (Рисунок 11).

Рисунок 13

Рентгенограммы матриц какао-бобов

Figure 13

Radiographs of Cocoa Bean Matrices



Примечание. из Венесуэлы (а), полученные на лабораторной рентгеновской установке (а) и на портативном рентгенографе (б).

Note. Cocoa Beans from Venezuela (a): radiographs obtained with the laboratory X-Ray system (a) and with the portable X-Ray unit (b).

Сравнение рентгенограмм с фотографиями разрезанных какао-бобов

Провели сравнение рентгеновских изображений какао-бобов с их продольными срезами (Рисунок 12). Установлено что, на рентгенограммах отчетливо визуализируются те же морфологические особенности, что и на срезах.

Рентгеновские изображения недоферментированных какао-бобов (1С, 2А и 3С) отличаются большей яркостью по сравнению с рентгеновскими изображениями семян хорошего качества.

На рентгенограммах выявлены признаки монолитности какао-бобов (1В), а также наличие в них ростков (3С), свидетельствующие об их недоразвитости. Неравномерность распределения оптической плотности на проекциях отдельных семян какао указывала на их дефективность.

Изученные на лабораторной рентгеновской установке какао-бобы также подвергли повторному исследованию с помощью портативного рентгенографа (Рисунок 13). Анализ полученных рентгенограмм подтвердил тождественность результатов обоих исследований.

На портативном рентгенографе отчетливо выявляются признаки дефектов семян какао, поэтому он может использоваться для контроля качества какао-бобов непосредственно в местах их ферментирования (на плантациях) или в складских помещениях.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе исследования разработан и апробирован экспрессный информативный подход к контролю качества какао-бобов на основе микрофокусной рентгенографии. Полученные результаты свидетельствуют о том, что неразрушающая рентгенографическая визуализация обеспечивает выявление дефектов, значимых для входного контроля и товароведческой оценки партий, при одновременном сокращении времени анализа и снижении влияния операторского фактора. Полученный результат согласуется с общей исследовательской линией применения рентгенографии в семеноводстве и контроле качества растительного сырья, где ключевыми эффектами выступают ускорение диагностики, объективизация процедуры и сохранность материала (Musaev & Beletskii, 2021; Musaev & Beletskii, 2019).

Принципиально важно, что выделенные рентген-признаки дефектов продемонстрировали согласование с морфологической картиной на продольных срезах. Этот результат означает, что микрофокусная рентгенография воспроизводит диагностически значимые структурные маркеры дефектности, которые традиционно устанавливаются разрушительным контролем, но переводит их в формат инструментального экспресс-скрининга. В отношении какао-бобов такой подход логично продолжает и усиливает ранее предложенные решения по идентификации дефектов, поскольку обеспечивает не только описание признаков, но и технологически воспроизводимую процедуру их регистрации на изображениях (Linovskaya et al., 2024).

Выбор именно микрофокусной рентгенографии методически оправдан ее способностью обеспечивать визуализацию тонких неоднородностей внутреннего строения объектов малого размера, что соответствует данным о результативности микрофокусной съемки в задачах неразрушающего контроля и диагностической визуализации (Potrakhov et al., 2016). Техническая реализуемость полученных изображений и воспроизводимость признаков дефектов дополнительно опираются на базовые положения лучевой диагностики и физико-технические характеристики рентгеновских источников, определяющие качество проекционных изображений (Korolyuk & Lindenbraten, 2017; Ivanov & Shchukin, 1989).

Сопоставление с предшествующими исследованиями на близких объектах подтверждает корректность логики «рентген-признак → диагностический вывод → технологическое решение». В работах по оценке качества семян с использованием рентгеноанализа показано, что неразрушающая визуализация эффективна для выявления скрытых дефектов и неоднородностей, критичных для сортировки партий и прогнозирования качества, включая применение цифровых методов и автоматизированных процедур анализа (Musaev et al., 2022; Arkhipov et al., 2025). Аналогично, исследования по микрофокусной рентгенографии для экспресс-оценки скрытой поврежденности зерна демонстрируют прикладную ценность метода именно в сценариях строгого контроля больших партий сырья (Arkhipov et al., 2025). В этом контексте вклад настоящей работы состоит в переносе и адаптации проверенного диагностического принципа на какао-бобы как специфический объект контроля товарного сырья.

Практическая значимость результатов дополнительно проявляется в том, что качество какао-бобов и их «товарность» существенно зависят от параметров ферментации, сушки и температурного режима; следовательно, ускорение и объективизация входного контроля создают условия для более управляемого обращения партий и снижения технологических рисков (Mougang et al., 2024). С учетом данных о влиянии способов обработки какао-бобов на физические и химические характеристики какао-продуктов, раннее выявление дефектной фракции может рассматриваться как фактор стабилизации качества сырья, поступающего в переработку (Sari et al., 2025).

Отдельного обсуждения заслуживает переход от экспертной интерпретации рентгенограмм к автоматизации. Разработка программы «Агротест-Какао-1.0» методически согласуется с направлением исследований, где автоматизация рентгенографического анализа качества семян и товарного зерна рассматривается как необходимый шаг для повышения воспроизводимости и производительности контроля, а также для получения стандартизируемых отчетных материалов (Zheludkov et al., 2018; Musaev et al., 2018). В более современных исследованиях показан потенциал машинного обучения в задачах обнаружения скрытых дефектов по данным цифровой рентгенографии, что поддерживает обозначенную авторами траекторию развития программного обеспечения — от распознавания ограниченного набора классов к расширению номенклатуры дефектов и оценке степени их выраженности (Platov et al., 2025). Концептуально близки и решения по идентификации и классификации сельскохозяйственного сырья по данным микрофокусной рентгенографии (в том числе в сочетании с другими инструментальными методами), демонстрирующие перспективность перехода от визуальной интерпретации к устойчивой алгоритмической классификации (Platov et al., 2024).

Перспектива создания рентгеновского сепаратора для автоматического отделения дефектных какао-бобов представляется логичным продолжением полученных результатов и согласуется с предшествующими работами, где рентгенсепарация описывается как следующий шаг развития технологий сортировки, расширяющий возможности оптической сепарации за счет анализа внутренней структуры объектов (Potrakhov et al., 2017). В более широком контексте исследований по современным принципам и техническим средствам

сепарации семян переход от диагностики к сортировке рассматривается как практико-ориентированное направление повышения качества партий (Beletskii et al., 2018).

Заявленные области применения: входной контроль на предприятиях и контроль в импортно-экспортных операциях, имеют обоснование, поскольку именно в этих сценариях критичны скорость, доказуемость и масштабируемость оценки качества. Дополнительное прикладное измерение связано с задачами оперативного выявления скрытой зараженности и скрытой поврежденности партий, что в литературе рассматривается как один из ключевых аргументов в пользу инструментальных методов контроля качества продовольственного зерна и семян (Ulanin et al., 2017; Ulanin et al., 2018).

Ограничения

Наряду с достоинствами работа имеет ограничения. Во-первых, внедрение метода связано с капитальными затратами на приобретение рентгеновского комплекса и организацию соответствующей инфраструктуры контроля; следовательно, целесообразность внедрения должна оцениваться через экономическую эффективность применения рентгенографического анализа качества семян в конкретных производственных условиях (Musaev & Beletskiy, 2019). Во-вторых, ограничивающим фактором является объем накопленных данных для построения оптимального алгоритма машинной обработки и повышения точности идентификации более тонких признаков (в частности, сортовых и региональных особенностей). В связи с этим дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение репрезентативной базы изображений, формирование эталонной разметки дефектов и их градаций и последующую валидацию точности автоматической классификации в условиях вариативности партий, обусловленной технологическими режимами обработки (Mougang et al., 2024; Platov et al., 2025).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения многофункциональных рентгеновских установок семейства ПРДУ для идентификационного контроля качества какао-бобов. Установки обеспечивают получение рентгенограмм как отдель-

ных семян, так и проб, включающих несколько десятков какао-бобов, что позволяет проводить экспрессную оценку качества при сохранении неразрушающего характера исследования.

Показано, что микрофокусная рентгенография может рассматриваться как оперативный и репрезентативный метод выявления дефектных какао-бобов в импортируемых партиях сырья. Сформированные в ходе работы рентгенографические признаки скрытых дефектов создают достаточную методическую основу для разработки специализированных технических и программных решений, ориентированных на автоматизацию контроля. В перспективе это открывает возможность создания рентгенографического комплекса сортировки, включая рентгеновский сепаратор товарных партий какао-сырья, обеспечивающий автоматическое отделение дефектной фракции.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Белецкий Сергей Леонидович: административное руководство исследовательским проектом; научное руководство; разработка концепции; разработка методологии; формальный анализ; курирование данных; проведение исследования; визуализация; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Линовская Наталия Владимировна: разработка методологии; проведение исследования; курирование данных; визуализация; валидация результатов; написание черновика рукописи.

Потрахов Николай Николаевич: курирование данных; написание черновика рукописи; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Гук Карина Константиновна: написание рукописи — рецензирование и редактирование.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Sergey Leonidovich Beletskiy: administrative management of the research project; scientific supervision; concept development; methodology development; formal analysis; data curation; study execution; visualization; manuscript writing — review and editing.

Natalya Vladimirovna Linovskaya: methodology development; study execution; data curation; visualization; results validation; manuscript draft writing.

Nikolay Nikolaevich Potrakhov: data curation; manuscript draft writing; manuscript writing — review and editing.

Karina Konstantinovna Guk: manuscript writing — review and editing.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипов, М. В., Прияткин, Н. С., Гусакова, Л. П., Потрахов, Н. Н., Тюкалов, Ю. А., Данилова, Т. А., & Белецкий, С. Л. (2025). Экспресс-оценка скрытой поврежденности партий зерна клопом вредная черепашка (*Eurygaster integriceps* Put.) методом микрофокусной рентгенографии. *Пищевая промышленность*, (5), 100–105. <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.5.5.018>
- Архипов, М.В., Прияткин, Н.С., Гусакова, Л.П., Карамышева, А.В., Трофимук, Л.П., Потрахов, Н.Н., Бессонов, В.Б., Щукина, П.А. (2020). Методика микрофокусной рентгенографии для выявления скрытой дефектности семян древесных лесных пород и других видов сосудистых растений. *Журнал технической физики*, 90(2), 338–346.
- Архипов, М. В., Тюкалов, Ю. А., Прияткин, Н. С., Гусакова, Л. П., Потрахов, Н. Н., & Белецкий, С. Л. (2017). Физико-технический базис для получения конкурентоспособного семенного материала. *Таврический вестник аграрной науки*, 4(12), 42–49.
- Архипов, М. В., Тюкалов, Ю. А., Синицына, С. М., Прияткин, Н. С., Гусакова, Л. П., Потрахов, Н. Н., Бессонов, В. Б., & Белецкий, С. Л. (2018). Новые технологии семеноводства: фундаментальные и прикладные аспекты. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*, (72), 38–42.
- Баженова, А. Е., & Пестерев, М. А. (2021). Исследование микрофлоры какао-продуктов и кондитерских изделий. *Пищевые системы*, 4(3S), 26–30. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-26-30>

- Балыхин, М. Г., Скобельская, З. Г., Рязанцева, В. А., & Бессараб, А. В. (2019). Повышение качества какао-бобов и продуктов их переработки под воздействием устройства ИВА-1. *Пищевая промышленность*, (7), 46–49.
- Белецкий, С. Л., Прияткин, Н. С., Архипов, М. В., & Гусакова, Л. П. (2018). Современные принципы и технические средства сепарации семян. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (3), 89–97.
- Гаврилова, Н. Г. (2024). Страны Африки в глобальном производстве и экспорте какао-бобов. *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*, (12), 107–115.
- Желудков, А. Г., Белецкий, С. Л., & Потрахов, Н. Н. (2018). Автоматизация рентгенографического метода анализа качества семян и товарного зерна злаковых культур. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 65–70.
- Иванов, С. А., & Щукин, Г. А. (1989). *Рентгеновские трубки технического назначения*. Энергоатомиздат.
- Королюк, И. П., & Линденбрэтэн, Л. Д. (2017). *Лучевая диагностика*. БИНОМ.
- Линовская, Н. В., Мазукабзова, Э. В., & Белецкий, С. Л. (2024). Новый подход к идентификации дефектов какао-бобов. *Пищевая промышленность*, (7), 65–67. <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.7.7.014>
- Матвеева, Н. Ф. (2020). Проблемы аграрного сектора в нефтедобывающих странах Африки: Экваториальная Гвинея. *Ученые записки Института Африки РАН*, 1(50), 38–47.
- Мусаев, Ф. Б. О., Прияткин, Н. С., Бухаров, А. Ф., Иванова, М. И., Кашлева, А. И., Щукина, П. А., Белецкий, С. Л., & Ушакова, О. В. (2020). Анализ разнокачественности семян лука Кристофа (*Allium cristophii* Trautv.) с помощью цифровой морфометрии. *Овощи России*, (2), 32–37.
- Мусаев, Ф. Б., & Белецкий, С. Л. (2019). Экономическая эффективность применения инновационного метода рентгенографического анализа качества семян. *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*, (1), 62–64.
- Мусаев, Ф. Б., & Белецкий, С. Л. (2021). История и перспективы применения рентгенографии в семеноводстве и семеноведении. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*, 24(6), 6–15.
- Мусаев, Ф. Б., Антошкина, М. С., Солдатенко, А. В., Белецкий, С. Л., & Потрахов, Н. Н. (2018). Алгоритмы автоматического цифрового анализа качества семян овощных культур. *Овощи России*, 3(41), 86–88.
- Мусаев, Ф. Б., Бухаров, А. Ф., & Козарь, Е. Г. (2017). Современный инструментальный метод контроля качества семян корнеплодных овощных культур. *Овощи России*, 4(37), 73–77.
- Платов, Ю. Т., Белецкий, С. Л., Метленкин, Д. А., Платова, Р. А., Верещагин, А. Л., & Марьин, В. А. (2024). Идентификация и классификация зерна гречихи методами микрофокусной рентгенографии и гиперспектрального изображения. *Дефектоскопия*, (4), 45–55.
- Платов, Ю. Т., Лысенкова, А. А., Зеленцов, С. В., Рассулов, В. А., Белецкий, С. Л., & Платова, Р. А. (2025). Неразрушающий контроль для выявления скрытых дефектов семян сои с использованием методов цифровой рентгенографии и машинного обучения. *Контроль. Диагностика*, 28(9), 43–54. <https://doi.org/10.14489/td.2025.09.pp.043-054>
- Потрахов, Н. Н., Белецкий, С. Л., & Архипов, М. В. (2018). Аппаратно-программный комплекс для контроля качества зерна на основе передвижной рентгенодиагностической установки ПРДУ-02. *Таврический вестник аграрной науки*, 4(16), 152–159.
- Потрахов, Н. Н., Белецкий, С. Л., & Мусаев, Ф. Б. (2017). Рентгенсепаратор — дальнейший шаг в развитии технологии оптической сепарации. *Овощи России*, 2(35), 40–42.
- Потрахов, Н. Н., Грязнов, А. Ю., Жамова, К. К., Бессонов, В. Б., & Потрахов, Ю. Н. (2016). Микрофокусная рентгенография: результаты исследований Санкт-петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова. *Территория NDT*, (3), 54–57.
- Потрахов, Н.Н., Гук, К.К., Бессонов, В.Б. (2023) Контроль промышленных изделий методом микрофокусной рентгенографии Заводская лаборатория. *Диагностика материалов*, 89(3), 31–37.
- Уланин, С. Е., Рассоха, С. Н., Шалыгина, Е. В., Гурьева, К. Б., Белецкий, С. Л., & Иванова, Е. В. (2017). Современные приборы и способы для обнаружения и определения скрытой зараженности продовольственного зерна и семян. *Пищевая промышленность*, (11), 12–14.
- Asitoakor, B. K., Asare, R., Ræbild, A., Ravn, H. P., Eziah, V. Y., Owusu, K., Mensah, E. O., & Vaast, P. (2022). Influences of climate variability on cocoa health and productivity in agroforestry systems in Ghana. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327, 109199. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109199>

- Asitoakor, B. K., Asare, R., Ræbild, A., Ravn, H. P., Eziah, V. Y., Owusu, K., Mensah, E. O., & Vaast, P. (2022). Influences of climate variability on cocoa health and productivity in agroforestry systems in Ghana. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327, 109199. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109199>
- Mougang, N. N., Tene, S. T., Zokou, R., et al. (2024). Influence of fermentation time, drying time and temperature on cocoa pods (*Theobroma cacao* L.) marketability. *Applied Food Research*, 4(2), Article 100460. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100460>
- Musaev, F., Priyatkin, N., Chesnokov, Y., Potrakhov, N., & Beletskiy, S. (2022). Assessment of brassicaceae seeds quality by x-ray analysis. *Horticulturae*, 8(1), Article 29. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010029>
- Platov, Y. T., Beletskii, S. L., Metlenkin, D. A., Platova, R. A., Vereshchagin, A. L., & Marin, V. A. (2024). Identification and classification of buckwheat grain by microfocus radiography and hyperspectral imaging methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 60(4), 446–454. <https://doi.org/10.1134/S1061830924601697>
- Sari, A. B. T., Efraim, P., Song, X., et al. (2025). Effects of processing methods of unfermented cocoa beans from Indonesia on the chemical and physical characteristics of butter and cake. *Journal of Agriculture and Food Research*, 25, Article 101563. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101563>
- Weinstein, M., Baram, S., Yermiyahu, U., Tsehansky, L., Elmakias, A., & Graber, E. R. (2025). Nitrogen, phosphorus and potassium deficiencies impact the transition from juvenility to maturity in *Theobroma cacao* L. *International Journal of Fruit Science*, 25(1), 36–47. <https://doi.org/10.1080/15538362.2025.2482685>

REFERENCES

- Archipov, M. V., Priyatkin, N. S., Gusakova, L. P., Potrakhov, N. N., Tyukalov, Yu. A., Danilova, T. A., & Beletskiy, S. L. (2025). Rapid assessment of hidden damage in grain batches by the sunn pest (*Eurygaster integriceps* Put.) using microfocus radiography. *Food Industry*, (5), 100–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.5.5.018>
- Arkhipov, M. V., Priyatkin, N. S., Gusakova, L. P., Karamysheva, A. V., Trofimuk, L. P., Potrakhov, N. N., Bessonov, V. B., & Shchukina, P. A. (2020). Microfocus X-ray method for detecting hidden defects in seeds of woody forest species and other types of vascular plants. *Technical Physics*, 65(2), 324–332. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/s1063784220020024>
- Archipov, M. V., Tiukalov, I. A., Priatkin, N. S., Gusakova, L. P., Potrakhov, N. N., & Beletskiy, S. L. (2017). Physical and technical basis for obtaining competitive seed material. *Taurida herald of the Agrarian Sciences*, 4(12), 42–49. (In Russ.)
- Archipov, M. V., Tiukalov, I. A., Sinitsyna, S. M., Priatkin, N. S., Gusakova, L. P., Potrakhov, N. N., Bessonov, V. B., & Beletskiy, S. L. (2018). New technologies in seed production: fundamental and applied aspects. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, (72), 38–42. (In Russ.)
- Bazhenova, A. E., & Pesterev, M. A. (2021). Study of the microflora of cocoa products and confectionery products. *Food Systems*, 4(35), 26–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-35-26-30> (In Russ.)
- Balychin, M. G., Skobelskaya, Z. G., Ryazantseva, V. A., & Bessarab, A. V. (2019). Improving the quality of cocoa beans and their processed products under the impact of the device IVA-1. *Food Industry*, (7), 46–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10109>
- Beletskiy, S. L., Priyatkin, N. S., Arkhipov, M. V., & Gusakova, L. P. (2018). Novel principles and technical solutions of seeds sorting. *Storage and Processing of Farm Products*, (3), 89–97. (In Russ.)
- Gavrilova, N. G. (2024). Role of African countries in global cocoa bean production and export. *Economy of Agricultural and Processing Enterprises*, (12), 107–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2024-0-12-107-115>
- Zheludkov, A. G., Beletskiy, S. L., & Potrakhov, N. N. (2018). Automation of X-ray Method for Analysis of Seed Quality and Commercial Grain of Cereals. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 65–70. (In Russ.)
- Ivanov, S. A., & Shchukin, G. A. (1989). *X-ray tubes for technical purposes*. Energoatomizdat. (In Russ.)
- Korolyuk, I. P., & Lindenbraten, L. D. (2017). *Radiation diagnostics*. BINOM. (In Russ.)
- Linovskaya, N. V., Mazukabzova, E. V., & Beletskiy, S. L. (2024). New approach to assessing the defects of cocoa beans. *Food Industry*, (7), 65–67. <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.7.7.014>

- Matveeva, N. F. (2020). Problems of agricultural sector in oil-producing countries of Africa: Equatorial Guinea. *Journal of the Institute for African studies Russian Academy of Sciences*, 1(50), 38–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.31132/2412-5717-2020-50-1-38-47>
- Musaev, F. B., Priyatkin, N. S., Bukharov, A. F., Ivanova, M. I., Kashleva, A. I., Schukina, P. A., Beletskiy, S. L., & Ushakova, O. V. (2020). Analysis of the variety of seeds quality *Allium cristophii* Trautv. with using digital morphometry. *Vegetable Crops of Russia*, (2):32–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-2-32-37>
- Musaev, F. B., & Beletskiy, S. L. (2019). Economic efficiency of applying the innovative method of x-ray analysis of seed quality. *Economy of Agricultural and Processing Enterprises*, (1), 62–64. (In Russ.)
- Musaev, F. B., & Beletskiy, S. L. (2021). History and prospects of application of x-ray diffraction analysis in seed breeding and seed study. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 24(6), 6–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-6-15>
- Musaev, F. B., Antoshkina, M. S., Soldatenko, A. V., Beletskiy, S. L., & Potrakhov, N. N. (2018). Algorithms for automatic digital analysis of vegetable seeds quality. *Vegetable crops of Russia*, 3(41), 86–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-3-86-88>
- Musaev, F. B., Bukharov, A. F., Kozar, E. G. & Beletskiy S.L (2017). Modern instrumental method for quality control of seeds of root vegetable crops. *Vegetable crops of Russia*, 4(37), 73–77. (In Russ.)
- Platov, Yu. T., Beletskiy, S. L., Metlenkin, D. A., Platova, R. A., Vereshchagin, A. L., & Mar'in, V. A. (2024). Identification and classification of buckwheat grain by microfocus radiography and hyperspectral imaging methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 60(4), 446–454. <https://doi.org/10.31857/S0130308224040057>
- Platov, Y. T., Lysenkova, A. A., Zelentsov, S. V., Rassulov, V. A., Beletskiy, S. L., & Platova, R. A. (2025). Non-destructive testing to detect hidden defects of soybean seeds using digital radiography and machine learning techniques. *Testing. Diagnostics*, 28(9), 43–54. <https://doi.org/10.14489/td.2025.09.pp.043-054>
- Potrakhov, N. N., Beletskiy, S. L., & Arkhipov, M. V. (2018). Hardware and software complex for grain quality control based on the mobile X-ray diagnostic unit PRDU-02. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*, 4(16), 152–159. (In Russ.) <https://doi.org/10.25637/TVAN2018.04.14>
- Potrakhov, N. N., Beletskiy, S. L., & Musaev, F. B. (2017). X-ray separator: forward step in technology of optical separation. *Vegetable Crops of Russia*, 2(35), 40–42. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-2-40-42> (In Russ.)
- Potrakhov, N. N., Gryaznov, A. Yu., Zhamova, K. K., Bessonov, V. B., & Potrakhov, Yu. N. (2016). Microfocus radiography: Results of research at Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". *NDT Territory*, (3), 54–57. (In Russ.)
- Potrakhov, N. N., Guk, K. K., & Bessonov, V. B. (2023). Control of industrial products by microfocus radiography. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 89(3), 231–237. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-3-31-37>
- Ulanin, S. E., Rassokha, S. N., Shalygina, E. V., Guryeva, K. B., Beletskiy, S. L., & Ivanova, E. V. (2017). Modern instruments and methods for detecting and determining hidden infestation of food grain and seeds. *Food Industry*, (11), 12–14. (In Russ.)
- Asitoakor, B. K., Asare, R., Ræbild, A., Ravn, H. P., Eziah, V. Y., Owusu, K., Mensah, E. O., & Vaast, P. (2022). Influences of climate variability on cocoa health and productivity in agroforestry systems in Ghana. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327, 109199. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109199>
- Asitoakor, B. K., Asare, R., Ræbild, A., Ravn, H. P., Eziah, V. Y., Owusu, K., Mensah, E. O., & Vaast, P. (2022). Influences of climate variability on cocoa health and productivity in agroforestry systems in Ghana. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327, 109199. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109199>
- Mougang, N. N., Tene, S. T., Zokou, R., et al. (2024). Influence of fermentation time, drying time and temperature on cocoa pods (*Theobroma cacao* L.) marketability. *Applied Food Research*, 4(2), Article 100460. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100460>
- Musaev, F., Priyatkin, N., Chesnokov, Y., Potrakhov, N., & Beletskiy, S. (2022). Assessment of brassicaceae seeds quality by x-ray analysis. *Horticulturae*, 8(1), Article 29. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010029>
- Platov, Y. T., Beletskii, S. L., Metlenkin, D. A., Platova, R. A., Vereshchagin, A. L., & Marin, V. A. (2024). Identification and classification of buckwheat grain by microfocus radiography and hyperspectral imaging methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 60(4), 446–454. <https://doi.org/10.1134/S1061830924601697>

- Sari, A. B. T., Efraim, P., Song, X., et al. (2025). Effects of processing methods of unfermented cocoa beans from Indonesia on the chemical and physical characteristics of butter and cake. *Journal of Agriculture and Food Research*, 25, Article 101563. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101563>
- Weinstein, M., Baram, S., Yermiyahu, U., Tsehansky, L., Elmakias, A., & Graber, E. R. (2025). Nitrogen, phosphorus and potassium deficiencies impact the transition from juvenility to maturity in *Theobroma cacao* L. *International Journal of Fruit Science*, 25(1), 36–47. <https://doi.org/10.1080/15538362.2025.2482685>

ОБ АВТОРАХ

Белецкий Сергей Леонидович, кандидат технических наук, доцент, директор Всероссийского научно-исследовательского института кондитерской промышленности — филиала Федерального государственного научного бюджетного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, (107023, Российская Федерация, Москва, ул. Электrozаводская, дом 20. стр. 3), ORCID: 0000-0003-4351-2674, AuthorID: 272033, SPIN: 4689-2733 grain-miller@yandex.ru

Линовская Наталия Владимировна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института кондитерской промышленности — филиала Федерального государственного научного бюджетного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, (107023, Российская Федерация, Москва, ул. Электrozаводская, дом 20. стр. 3), SPIN-код: 4257-7789, AuthorID: 613010, choclab@mail.ru

Потрахов Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), (197376, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. проф. Попова), SPIN-код: 8875-7322, AuthorID: 134752, nnpotrahov@etu.ru

Гук Карина Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), (197376, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. проф. Попова), SPIN-код: 7887-6684, AuthorID: 742872, kzhamova@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Sergey Leonidovich Beletskiy, PhD in Engineering, Associate Professor, Director of the All-Russian Research Institute of the Confectionery Industry — Branch of the Federal State Scientific Budgetary Institution V.M. Gorbatov Federal Scientific Center of Food Systems of the Russian Academy of Sciences, (107023, Russian Federation, Moscow, Elektrozavodskaya St., Building 20, Bldg. 3), ORCID: 0000-0003-4351-2674, AuthorID: 272033, SPIN: 4689-2733 grain-miller@yandex.ru

Natalya Vladimirovna Linovskaya, PhD in Engineering, Leading Researcher, All-Russian Research Institute of the Confectionery Industry — Branch of the Federal State Scientific Budgetary Institution V. M. Gorbatov Federal Scientific Center of Food Systems of the Russian Academy of Sciences. V. M. Gorbatov Institute of Electrotechnical Sciences, Russian Academy of Sciences, (20 Elektrozavodskaya St., Bldg. 3, Moscow, 107023, Russian Federation), SPIN: 4257-7789, AuthorID: 613010, choclab@mail.ru

Nikolai Nikolaevich Potrahov, D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), (197376, Saint Petersburg, ul. prof. Popova), SPIN: 8875-7322, AuthorID: 134752, nnpotrahov@etu.ru

Karina Konstantinovna Guk, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanova (Lenina), (197376, St. Petersburg, Prof. Popova street), SPIN code: 7887-6684, AuthorID: 742872, kzhamova@gmail.com

Биохимический состав и пищевая ценность зерна сортов сои различных групп спелости, возделываемых в условиях юга России

О.Г. Шабалдас

Ставропольский государственный аграрный университет,
г. Ставрополь, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) является одной из базовых зернобобовых культур мирового земледелия и стратегическим сырьем для пищевой и кормовой индустрии благодаря высокому содержанию растительного белка и масла. Вместе с тем остается методологически значимый пробел в уточнении того, как сортовые особенности в сочетании с условиями выращивания в зоне неустойчивого увлажнения влияют на формирование урожайности, накопление белка и жира, а также выраженность антипитательных факторов (в частности, трипсинингибирующей активности).

Цель: Оценить урожайность, биохимический состав и технологические показатели зерна сортов сои различных групп спелости, возделываемых на Юге России, и выделить генотипы, обеспечивающие стабильную продуктивность и качество в неблагоприятных климатических условиях.

Материалы и методы: Полевые исследования выполнены в 2017–2019 гг. на опытной станции Ставропольского ГАУ. Изучали сорта Лира (стандарт), Бара, Парус, Кора, Вилана, Зара. Содержание белка и жира определяли по действующим ГОСТ (ГОСТ 10846-91; ГОСТ ISO 11085-2016), трипсинингибирующую активность — по ГОСТ 33427-2015; измерения проводили методом ИК-спектроскопии на MA-TRIX-I с регистрацией спектров в диапазоне 3500–12500 см⁻¹ (разрешение 16 см⁻¹) в соответствии с ПО OPUS. Технологические показатели включали массу зерна и массу 1000 семян (ГОСТ 12042-80).

Результаты: Максимальная урожайность в условиях зоны неустойчивого увлажнения получена у среднеспелого сорта Зара — 2,22 т/га, что превышает стандарт (Лира) на 0,39 т/га. Наивысшая экологическая пластичность выявлена у раннеспелого сорта Кора ($b_i = 1,51$). Этот же сорт характеризовался максимальным суммарным содержанием белка и жира в зерне (62,2%). Минимальная трипсинингибирующая активность установлена у сорта Парус (19,8 мг/г). В целом, качество зерна изученных сортов соответствует требованиям к соевому сырью для пищевого и кормового использования.

Выводы: Результаты подтверждают выраженную сортовую специфичность продуктивности и качества соевого зерна и обосновывают практический подбор сортов для зоны неустойчивого увлажнения: Зара (как продуктивный генотип), Кора (как пластичный и высококачественный по белково-жировому комплексу), Парус (как перспективный по сниженной ТИА). Полученные данные могут быть использованы при селекционно-технологическом сопровождении производства сои для пищевой и перерабатывающей промышленности.

Ключевые слова: соя; сорт; зона неустойчивого увлажнения; урожайность; экологическая пластичность; качество зерна; белково-жировой комплекс; трипсинингибирующая активность; инфракрасная спектроскопия; масса 1000 семян

Корреспонденция:

Ольга Георгиевна Шабалдас
E-mail: shabaldas-olga@mail.ru

Конфликт интересов:

автор сообщает
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 07.08.2025

Принята: 15.12.2025

Опубликована: 30.12.2025

Copyright: © 2025 Автор



Для цитирования: Шабалдас, О.Г. (2025). Биохимический состав и пищевая ценность зерна сортов сои различных групп спелости, возделываемых в условиях юга России. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 73-87. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.97>

Influence of Climatic Conditions on the Biochemical Composition and Nutritional Value of Soybean Grain Varieties

Olga G. Shabaladas

Stavropol State Agrarian University,
Stavropol, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) is one of the principal grain legume crops in global agriculture and a strategic raw material for the food and feed industries due to its high protein and oil contents. However, a methodologically important gap remains in clarifying how cultivar characteristics, in combination with growing conditions in zones of unstable moisture supply, affect yield formation, protein and oil accumulation, and the expression of antinutritional factors, particularly trypsin inhibitor activity.

Purpose: To assess yield, biochemical composition, and technological grain traits of soybean cultivars from different maturity groups grown in southern Russia, and to identify genotypes that ensure stable productivity and grain quality under adverse climatic conditions.

Materials and Methods: Field trials were conducted in 2017–2019 at the experimental station of Stavropol State Agrarian University. The cultivars Lira (standard), Bara, Parus, Kora, Vilana, and Zara were evaluated. Protein and oil contents were determined according to current GOST standards (GOST 10846-91; GOST ISO 11085-2016), and trypsin inhibitor activity (TIA) according to GOST 33427-2015. Measurements were performed by near-infrared (NIR) spectroscopy using an MA-TRIX-I spectrometer, with spectra recorded over 3500–12500 cm⁻¹ at a resolution of 16 cm⁻¹ using OPUS software. Technological traits included test weight and 1000-seed weight (GOST 12042-80).

Results: The highest yield under unstable moisture conditions was obtained for the mid-season cultivar Zara (2.22 t/ha), exceeding the standard (Lira) by 0.39 t/ha. The early-maturing cultivar Kora showed the greatest ecological plasticity ($bi = 1.51$) and the highest combined protein and oil content (62.2%). The lowest trypsin inhibitor activity was recorded for Parus (19.8 mg/g). Overall, grain quality parameters of the studied cultivars met the requirements for soybean raw material used in food and feed applications.

Conclusion: The findings confirm pronounced cultivar-specific differences in soybean productivity and grain quality and support evidence-based cultivar selection for zones of unstable moisture supply: Zara as a high-yielding genotype, Kora as a highly plastic genotype with superior protein–oil traits, and Parus as a promising cultivar with reduced TIA. The results may inform breeding and technological support of soybean production for the food and processing industries.

Keywords: soybean; cultivar; zone of unstable moisture supply; yield; ecological plasticity; grain quality; protein–oil complex; trypsin inhibitor activity; near-infrared spectroscopy; 1000-seed weight

Correspondence:

Olga G. Shabaladas

E-mail: shabaladas-olga@mail.ru

Conflict of interest:

The author report the absence of a conflict of interest.

Received: 07.08.2025

Accepted: 15.12.2025

Published: 30.12.2025

Copyright: © 2025 The Author



To cite: Shabaladas, O.G. (2025). Influence of climatic conditions on the biochemical composition and nutritional value of soybean grain varieties. *FOOD METAENGINEERING*, 3(4), 73-87. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.4.97>

ВВЕДЕНИЕ

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) относится к числу ключевых бобовых культур мирового сельского хозяйства и занимает стратегическое место в системе продовольственного и кормового обеспечения благодаря сочетанию высокого содержания масла и белка, а также широкому спектру направлений переработки, включая получение пищевого растительного масла и белковых экстрактов для пищевых продуктов и кормов. Значимость культуры для производства продовольствия и для отрасли животноводства последовательно подчеркивается в современных работах, рассматривающих сою как универсальное сырье для формирования белково-жирового баланса в агропродовольственных цепочках (Banti, 2021; Синеговская, 2023; Поминов и соавт., 2025).

Глобальная роль сои подтверждается масштабами ее возделывания, сосредоточенными в крупнейших аграрных регионах, при этом география производства отражает устойчивый спрос на соевое сырье и продукты его глубокой переработки. Наибольшие площади посевов культуры приходятся на страны Американского континента и Южной Азии, что фиксируется в аналитических обзорах по мировому рынку и производственным тенденциям (Kumar et al., 2025). В российском аграрном контексте актуальность исследования сои усиливается расширением практик ее использования как в пищевом секторе, так и в кормопроизводстве, что делает сопоставление продуктивности и качественных характеристик семян в конкретных условиях возделывания прикладной задачей для растениеводства и переработки (Литвиненко с соавт., 2019; Guo et al., 2022; Речкина и соавт., 2024; Тимошкин и соавт., 2025).

Пищевая и технологическая ценность сои определяется прежде всего качеством ее белкового комплекса и жирнокислотного профиля масла. Соевый белок рассматривается как высококачественный и сбалансированный по аминокислотному составу компонент рациона человека и животных и находит применение не только в пищевой промышленности и животноводстве, но также в медицинской промышленности, что отражено в исследованиях, посвященных функциональным свойствам и направлениям использования соевых белков и продуктов их переработки (Вишнякова и соавт., 2017; Guo et al.; Zheng et al., 2022; Козлова и соавт., 2023).; Существенную роль в кормовом секторе играет соевый шрот как побочный продукт экстракции масла,

который характеризуется высоким содержанием белка и рассматривается как значимый источник аминокислот и биологически активных соединений в составе комбикормов (Long, et al., 2021; Бельштина и соавт., 2024; Deng, 2024).

Дополнительный интерес к соевым продуктам связан с присутствием в семенах фитоэстрогенов и других биологически активных веществ, включая фосфолипиды, токоферолы, изофлавоны, витамины группы В, а также ряд макро- и микроэлементов, что расширяет функциональные аргументы в пользу использования сои в пищевых системах (Литвиненко и соавт., 2023; Belobrajdic et al., 2023; Корнева, Литвиненко, 2023). При этом в контексте оценки качества семян особое значение приобретает характеристика запасных белков, в частности глицинина, доля которого в белковом комплексе семян рассматривается как существенная, а показатели белка и сахаров фиксируются как критерии, влияющие на ценность и устойчивость пищевых и кормовых продуктов (Кодирова и соавт., 2024; Jamison et al., 2024).

Актуальность исследований сои дополнительно усиливается развитием технологических подходов к созданию белково-витаминных и белково-углеводных добавок на основе соевого сырья, применяемых для повышения пищевой ценности продуктов питания. В работах последних лет подчеркивается роль технологических процессов переработки соевого зерна при получении концентратов и гранулятов, а также эффективность использования зерновых и бобовых культур в составе измельченных смесей при производстве продуктов функционального назначения, включая хлебобулочные изделия (Скрипко, 2020; Шаймерденова и соавт., 2019; Рустемова & Ребезов, 2023; Chu et al., 2025). Таким образом, требования к сырью сои в современных производственных цепочках закономерно выходят за рамки количественной урожайности и включают устойчивые параметры состава и технологических свойств семян. (Banti, 2021; Zheng et al., 2022; Kohli & Singha, 2024).

Одновременно с высокой пищевой и кормовой ценностью соя характеризуется наличием антипитательных факторов белковой природы, способных подавлять активность пищеварительных ферментов, прежде всего трипсина. Трипсин как фермент класса гидролаз обеспечивает расщепление пептидов и белков в желудочно-кишечном тракте человека и животных, поэтому ингибирование его активности рассматривается как фактор, ограничивающий использование соевого сы-

рья без адекватной селекционной или технологической коррекции (Kasprowicz-Potocka et al., 2022; Zheng et al., 2022; Макаров и соавт., 2023; Priyanka, 2024).

В этой связи качество семян сои следует рассматривать в комплексной логике, где наряду с показателями белка, масла и технологических характеристик существенное значение имеет уровень ингибиторной активности и ее вариабельность в зависимости от генотипа.

Селекция остается одним из ключевых инструментов повышения урожайности и качества сельскохозяйственных культур, а для сои задача получения сортов, обеспечивающих одновременно стабильную продуктивность и высокий уровень качественных характеристик семян, приобретает особую значимость. В литературе подчеркивается приоритет сортовой селекции как основы формирования устойчивых урожаев и улучшения хозяйственно ценных признаков культуры, что задает рамку для прикладных исследований по сравнительной оценке сортов по комплексу продуктивных и качественных показателей (Qin et al, 2022; Николаев и соавт., 2024) Исходя из этого, цель настоящей работы заключается в сравнительной оценке сортов сои по показателям продуктивности и качества семян, включая характеристики белково-жирового состава и параметры, связанные с антипитательными факторами, с последующим обоснованием сортовой предпочтительности для практики возделывания и переработки в исследуемых условиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования служили сорта сои селекции ВНИИМК им. В.В. Пустовойта — Лира, Парус, Кора, Вилана, Зара, а также сорт Бара (соевый комплекс СОКО). По группам спелости изучаемые сорта распределялись следующим образом: скороспелые — Лира, Бара; раннеспелые — Парус, Кора; среднеспелые — Вилана, Зара. В качестве стандарта использовали скороспелый сорт Лира (регистрация 2003 г.). Сорт Вилана зарегистрирован в 1996 г., Бара — в 2007 г., Парус и Кора — в 2017 г.

Место и условия проведения опыта

Зерно сои для исследования биохимического состава получали с опытного поля Ставропольского государственного аграрного университета. Почвенный покров

опытной станции представлен чернозёмом выщелоченным мощным малогумусным тяжёлосуглинистым. Для данной почвы отмечены: содержание гумуса 5,1–5,4% (по Тюрину), содержание легкогидролизуемого азота 16–30, нитрификационная способность — по Кравцову (в модификации Болотиной). Содержание подвижного фосфора составляло 20–25 (по Мачигину), обменного калия — 220–270 мг/кг почвы (по Кирсанову; ГОСТ Р 54650–2011). Реакция среды — слабокислая или близкая к нейтральной, pH 6,5 (ГОСТ 26483). Территория проведения опытов относится к зоне неустойчивого увлажнения.

Агротехника и схема опыта

Технология возделывания сои была общепринятой для Северо-Кавказского региона. Предшественником являлась озимая пшеница; после уборки выполняли двукратное лущение стерни с последующей вспашкой на 20–22 см. Перед посевом семена обрабатывали бактериальным препаратом Ризоторфин (штамм 6266). Посев проводили в первой декаде мая (7–10 мая) сеялкой точного высева СПЧ-4 при ширине междурядий 70 см. Нормы высева (млн всхожих семян/га) дифференцировали по группам спелости: для скороспелых — 0,6, для раннеспелых — 0,5, для среднеспелых — 0,4.

В период вегетации проводили защитные обработки:

- (1) в фазу 1–2 тройчатых листа — обработка баковой смесью гербицидов Базагран, ВР (бенфазон 480 г/л) 2 л/га + Хармони, СТС (тифенсульфурон-метил 750 г/кг) 0,008 кг/га;
- (2) при появлении болезней выше экономического порога вредоносности, в фазу бутонизации — фунгицид Аканто Плюс, КС (пикоксистробин + ципроконазол, 200+80 г/л) 0,6 л/га;
- (3) против вредителей в фазу образования бобов — инсектицид Шарпей, МЭ (циперметрин 250 г/л) 0,2 л/га.

Варианты в опыте размещали систематическим методом; повторность — четырехкратная. Общая площадь делянки составляла 46,2 м², учётная площадь — 28,0 м².

Показатели и порядок отбора проб

Гидротермический коэффициент рассчитывали по методике Г.Т. Селянинова (1928). Экологическую пластичность сортов определяли по методике Eberhart, Russell

(1966). Семена отбирали в четырёхкратной повторности с вариантов опыта в фазу полной спелости, при влажности зерна 10–12 %.

Лабораторные методы анализа качества зерна

Лабораторные исследования (содержание белка, жира и определение трипсинингибирующей активности белка сои) выполняли в агрохимической лаборатории Ставропольского ГАУ. Подготовку проб осуществляли согласно ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Определение: белка — по ГОСТ 10846-91; жира — по ГОСТ ISO 11085-2016; трипсинингибирующей активности (ТИА) — по ГОСТ 33427-2015 методом спектрального анализа.

Измерения проводили методом ИК-спектроскопии на МА-TRIX-I; спектры регистрировали в диапазоне 3500–12500 см⁻¹ с разрешением 16 см⁻¹ в соответствии с руководством к ПО OPUS. Технологические показатели включали: натуру зерна (литровая пурка с падающим грузом); массу 1000 семян — по ГОСТ 12042-80.

Статистическая обработка данных

Математическую обработку выполняли методами корреляционного и регрессионного анализа с использованием программы «Агрос», а также по Б.А. Доспехову (1985).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Климатические условия

Роль влияния абиотических факторов на продуктивность сельскохозяйственных культур, в том числе и сои, является ощутимой, в первую очередь экстремальные температуры и дефицит влаги могут приводить к существенным потерям урожая. Зерно сои для дальнейшего определения его биохимического состава было получено при выращивании на территории опытной станции Ставропольского государственного аграрного университета, которая расположена на высоте 575 м над уровнем моря, между 45°02'34" с.ш. и 41°58'24" в.д., территория опытной станции СтГАУ относится к зоне неустойчивого увлажнения. В годы исследований складывались различные климатические условия, количество осадков и температура воздуха по годам отличались (Рисунки 1, 2).

Наиболее критические для роста и развития растений сои погодные условия для сортов всех групп спелости складывались в 2018-2019 гг., когда в межфазный период всходы-начало цветения выпадало минимальное количество осадков от 23,3 до 29,6 мм.

Скороспелые сорта Лира и Бара были наименее обеспечены осадками в межфазный период конец цветения — физиологическая спелость. Наиболее благоприятным по обеспечению влагой отмечен 2017 г.

В южных регионах страны растения сои обеспечены достаточным количеством тепла, однако в последние годы наблюдается увеличение среднегодовой

Рисунок 1

Количество осадков, распределяющихся по межфазным периодам развития сои

Figure 1

Amount of Precipitation Distributed over the Interphase Periods of Soybean Development

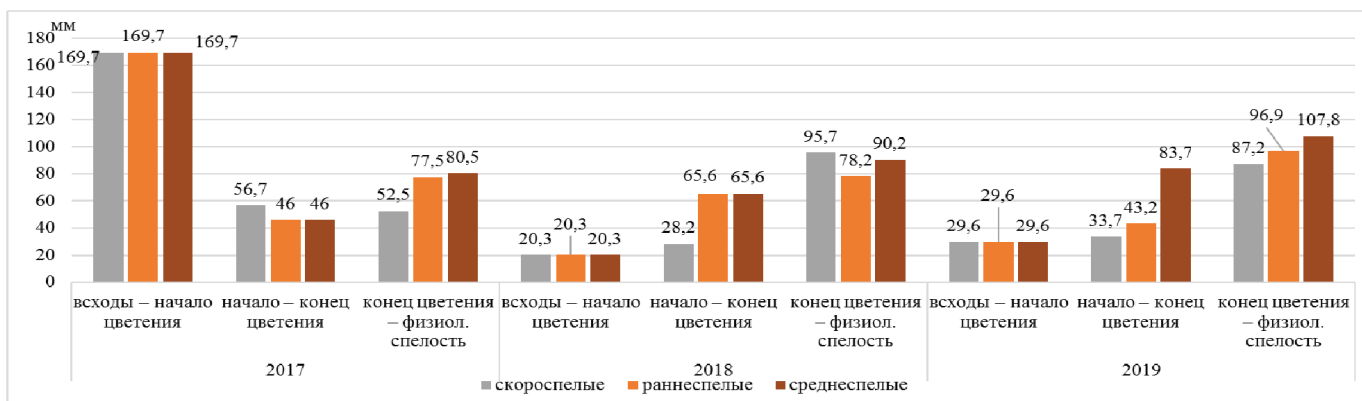
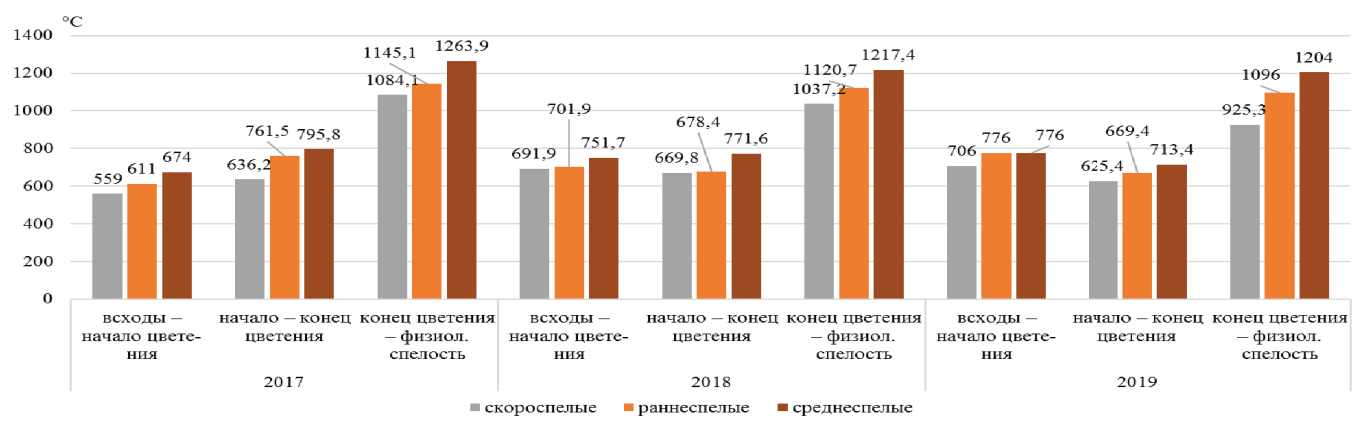


Рисунок 2

Сумма активных температур в межфазные периоды развития сои

Figure 2

Sum of Active Temperatures during the Interphase Periods of Soybean Development



годовой температуры воздуха на 0,8–1,0°C, увеличение температуры воздуха, особенно во второй половине вегетационного периода развития растений сои при не достаточном количестве осадков часто приводит к снижению продуктивности сои. Наиболее высокая сумма активных температур в период от конца цветения до физиологической спелости зерна приходилась на 2017 г. и варьировала в зависимости от группы спелости в пределах от 1084,1 до 1263,9°C.

Учитывая количество выпавших осадков и сумму активных температур следует отметить, что гидротермиче-

ский коэффициент в целом за вегетационный период сои в 2017 г. составлял 1,2, а в 2018–2019 гг. — 0,6–0,7.

Биологические особенности сои

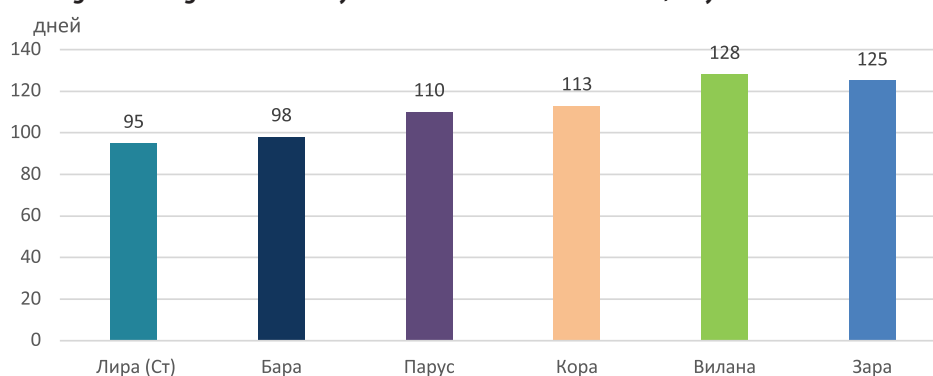
Важным показателем сортовых особенностей генотипа является длина вегетационного периода сои, которая позволяет отнести сорт к соответствующей группе спелости. В результате исследований установлено, что вегетационный период изучаемых сортов сои отличался, что связано с биологическими особенностями растений и складывающимися погодными условиями (Рисунок 3).

Рисунок 3

Вегетационный период сортов сои в среднем за 2017–2019 гг., дней

Figure 3

Average Growing Season of Soybean Varieties in 2017–2019, Days



В среднем за три года исследований вегетационный период сортов варьировал в пределах от 95 до 128 дней, наиболее продолжительным он был отмечен у сорта Вилана — 128 дней, самым скороспелым был сорт Лира, длина вегетационного периода которого составляла 95 дней.

Экологическая пластичность сортов сои

В последние годы значительным достижением в области селекции и генетики является создание адаптивных сортов сои, которые характеризуются высокой и стабильной урожайностью. На продуктивность сои, то есть стабильную урожайность и высокое качество зерна влияют прежде всего сортовые особенности растения, обусловленные генотипом растения, а также почвенно-климатические условия, что подтверждается нашими исследованиями, которые указывают на то, что урожайность сортов сои различных групп спелости значительно отличалась по группам спелости, наиболее урожайными отмечены среднеспелые сорта с вегетационным периодом 125–128 дней. Наибольшая урожайность сортов была получена в 2017 г., которая

варьировала в зависимости от сорта от 1,84 (сорт Бара) до 2,30 (сорт Парус) т/га, что достоверно подтверждается результатами математической обработки (Таблица 1).

Существенная разница в прибавке урожая в зависимости от года установлена по всем сортам. Индекс среды в 2018г. (-0,14) и в 2019 (-0,01) г. подтверждает то, что в эти годы складывались наиболее критические условия для роста и развития растений сои. В 2017 г. обеспечивающем за вегетационный период скороспелых сортов 278,9 мм осадков при сумме активных температур 2279,3 °С (ГТК 1,2), раннеспелых — 293,9 мм и 2517,6 °С (ГТК 1,1) и среднеспелых — 296,2 и 2733,7 °С (ГТК 1,1) был наиболее благоприятным для роста и развития растений сои. Коэффициент регрессии — $b_i > 1$, характеризующий экологическую пластичность наиболее высоким был у сорта Парус, который превышал стандарт на 0,21 единицы.

Содержание белка и жира в зерне является основополагающей характеристикой сортов сои для дальнейшего определения его использования на пищевые или кормовые цели. Определение качественного состава зерна сои показало значительные отличия в накопле-

Таблица 1

Урожайность и экологическая пластичность сортов сои

Table 1

Yield and Ecological Plasticity of Soybean Varieties

Сорт (фактор A)	Год (фактор B) Урожайность по сорту, т/га			Yi суммарная урожай- ность по сортам	Yi средняя урожай- ность по сортам	bi коэффициент регрес- сии (экологическая пластичность)
	2017 г.	2018 г.	2019 г.			
Скороспелые						
Ли́ра (Ст)	1,96	1,68	1,85	5,49	1,83	1,30
Ба́ра	1,84	1,50	1,70	5,04	1,68	0,94
раннеспелые						
Па́рус	2,30	1,83	1,91	6,04	2,01	1,38
Ко́ра	2,20	1,67	1,81	5,68	1,89	1,51
Среднеспелые						
Ви́лана	2,20	2,19	2,10	6,49	2,16	0,52
За́ра	2,21	2,10	2,35	6,66	2,22	0,61
ΣYi суммарная урожайность по годам	12,78	10,97	11,72	35,47	1,97	—
Yj средняя урожайность по годам	2,12	1,82	1,95	—	—	—
Ij (индекс среды)	0,16	-0,14	-0,01	—	—	—

Примечание. HCP_{05} по фактору А = 0,10; HCP_{05} по фактору В = 0,07 HCP_{05} взаимодействия факторов АВ = 0,12; S_x %1,21 достоверность на уровне 0,95.

Note. LSD_{0-05} for factor A = 0.10; LSD_{0-05} for factor B = 0.07; LSD_{0-05} for the interaction AxB = 0.12; S_x = 1.21%; significance level = 0.95.

О.Г. Шабалдас

Таблица 2
Содержание белка и сырого жира в зерне сортов сои

Table 2
Content of Vegetable Protein and Fat in Soybean Varieties

Сорт (фактор А)	Год (фактор В)						Среднее	
	2017		2018		2019			
	содержание, %							
	белка	жира	белка	жира	белка	жира	белка	жира
Скороспелые								
Ли́ра(Ст)	36,7	19,1	37,0	17,9	37,3	18,0	37,0	18,3
Ба́ра	37,5	19,0	37,7	18,8	37,6	19,2	37,6	19,0
Раннеспелые								
Па́рус	37,6	23,0	38,8	22,5	38,2	21,9	38,2	22,5
Ко́ра	39,0	23,4	40,0	22,0	39,1	22,4	39,4	22,6
Среднеспелые								
Ви́лана	39,9	21,4	41,0	19,4	40,3	20,8	40,4	20,5
За́ра	39,6	23,3	41,0	21,4	39,2	22,2	39,9	22,3
Примечание. по белку: НСР ₀₅ по фактору А = 0,81, НСР ₀₅ по фактору В = 1,10, НСР ₀₅ взаимодействия факторов АВ = 0,93 по жиру: НСР ₀₅ по фактору А = 0,36, НСР ₀₅ по фактору В = 1,3, НСР ₀₅ взаимодействия факторов АВ = 0,12 достоверность на уровне 0,95 Note. For protein: LSD _{0.05} for factor А = 0.81; LSD _{0.05} for factor В = 1.10; LSD _{0.05} for the interaction АxВ = 0.93. For fat: LSD _{0.05} for factor А = 0.36; LSD _{0.05} for factor В = 1.30; LSD _{0.05} for the interaction АxВ = 0.12. Significance level = 0.95.								

нии белка и жира в зерне сои в зависимости от сорта и года исследований. Учитывая данные «Международного классификатора СЭВ» рода *Glycine* Willd сорта сои в целом можно отнести к среднебелковым и среднемасличным (Таблица 2).

Биохимический состав и технологические показатели зерна сои

Достоверное увеличение содержания белка и жира в зерне сои по сравнению с стандартом установлено по сортам Парус, Кора, Вилана и Зара, содержание белка в зерне которых было больше стандарта на 1,2–3,4, а жира на 2,2–4,3 % соответственно. Существенная разница в увеличении белка в зависимости от климатических условий подтверждается по сортам Парус, Вилана и Зара, жира по сортам Кора и Зара. В среднем за три года исследований наиболее белковыми отмечены среднеспелые сорта Вилана и Зара, содержание белка в зерне сои которых составляло 39,9–40,4 %, наиболее высокомасличными сорта Парус и Кора — 22,5–22,6 %.

Большое значение в питании животных и человека играют сахара и крахмал, гликозиды и др. в связи с этим данные показатели включены в состав нормируемых показателей. Углеводы в зерне сои представлены растворимыми сахарами: сахарозой, полисахаридами, фруктозой и др. и нерастворимыми структурными полисахаридами. В среднем по сортам общее количество углеводов со-

ставляло 23,5 %, Математическая обработка полученных результатов исследований подтверждает существенную разницу по образованию общих углеводов по сравнению с стандартом только по сорту Вилана, а клетчатки по сортам Вилана и Зара (Таблица 3).

При определении содержания безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) установлено, что в среднем по сортам их количество составляло 39,7% при этом варьирование данного показателя находилось в пределах от 38,2 (сорт Ли́ра) до 42,3 (сорт За́ра) %. необходимо отметить, что статистические различия по содержанию БЭВ по сравнению с стандартом установлены у сортов Вилана и Зара. Показатель зольности в среднем по сортам составлял 4,6% существенные различия по сравнению с сортом Ли́ра отмечены по сортам Вилана и Зара. Показатель массы 1000 семян позволяет характеризовать выровненность и крупность зерна, что является одним из важных технологических признаков. При определении массы 1000 семян установлено, что данный показатель имел значительные отличия по сортам, наиболее крупное и выровненное зерно имел сорт Зара. Наибольший показатель натурности зерна отмечен у среднеспелых сортов Вилана и Зара, который составлял в среднем за три года исследований 765–771г/л, что достоверно больше по сравнению с стандартным сортом.

Ингибиторы протеаз взаимодействуют с ферментами и при этом создаются устойчивые соединения, кото-

Таблица 3

Химический состав и технологические показатели зерна сортов сои в среднем за 2017–2019 гг.

Table 3

Chemical Composition and Technological Indicators of Soybean Varieties in 2017–2019

Сорт	Химический состав				Технологические показатели	
	содержание, %					
	углеводы		БЭВ	Зола	Масса 1000 семян, г	Натура зерна, г/л
	общие	в.т.ч. клетчатка				
Скороспелые						
Ли́ра (Ст)	23,5	6,1	38,2	4,2	145,9	759
Ба́ра	22,3	5,4	38,5	4,4	136,0	754
Раннеспелые						
Па́рус	22,8	6,2	39,4	4,6	149,8	764
Ко́ра	23,0	6,0	38,9	4,5	149,0	772
Среднеспелые						
Ви́лана	25,2	7,9	40,9	4,9	151,5	765
За́ра	24,4	7,3	41,3	5,1	155,0	771
НСР ₀₅ достоверность на уровне 0,95	1,1	0,1	1,2	0,05	7,3	5,1

рые лишены, как ингибиторной, так и ферментативной активности. В последние годы в селекционной работе уделяется большое внимание вопросам снижения ТИА, в связи с этим определен интерес представляло определение ТИА в зерне различных сортов сои. Ранее проведенными исследованиями биохимического состава зерна сои установлено, что трипсинингибирую-

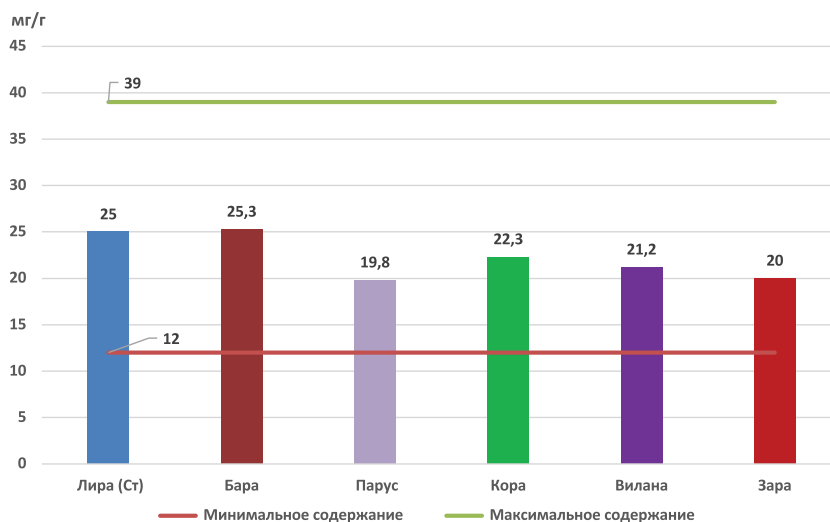
щая активность зависит от генотипа и условий выращивания сои и варьирует в пределах от 12,0 и 39,0 мг/г. При определении трипсинингибирующей активности белка сои (ТИА) установлено, что данный показатель по изучаемым сортам варьировал в пределах от 19,8 до 25,3 мг/г, что свидетельствует об относительно низком содержании антипитательных веществ в зерне (Рисунок 4).

Рисунок 4

Трипсинингибирующая активность белка в зерне сои в среднем за 2017–2019 гг., мг/г

Figure 4

Average Trypsin-Inhibiting Activity of Soybean Protein in 2017–2019, mg/g



Наибольшее содержание ТИА отмечено в белке сорта Бара — 25,3 мг/г, наименьшим содержанием антипитательных веществ — 19,8 мг/г отличался сорт Зара.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Цель исследования состоит в сравнительной оценке продуктивности и качества семян сортов сои различных групп спелости в конкретных почвенно-климатических условиях. Полученные данные в целом позволяют решить эту задачу и соотнести результаты с современной логикой селекции, которая ориентирована на создание генотипов, адаптированных к региональной среде и способных обеспечивать не только стабильную урожайность, но и высокий уровень питательной ценности зерна (Зайцев и соавт., 2020; Зеленцов и соавт., 2023; Синеговская, 2023).

Выполненная оценка показывает, что реализация потенциала урожайности определяется совместным влиянием сортовых особенностей и условий года. Наблюдаемое преимущество среднеспелой группы по урожайности в пределах исследованной выборки можно интерпретировать как проявление адаптивности данной группы к условиям опыта и как подтверждение значимости подбора генотипов с оптимальной продолжительностью вегетационного периода для конкретной зоны возделывания. Подобная постановка вопроса соответствует селекционной задаче повышения устойчивости продуктивности и предсказуемости хозяйственно ценных признаков (Зайцев и соавт., 2020; Зеленцов и соавт., 2023).

Качество семян, оцениваемое по показателям белка и жира, в исследовании также демонстрирует сортовую дифференциацию. Выделение сортов с более высоким содержанием белка и сортов с более высоким содержанием жира подтверждает, что качественный профиль семян следует рассматривать как комплексный признак и соотносить его с целевым использованием зерна. С практической точки зрения это означает, что сортовая рекомендация должна учитывать не только общий уровень продуктивности, но и желаемое соотношение белка и жира, поскольку требования пищевых и кормовых направлений переработки могут различаться (Зеленцов и соавт., 2023; Синеговская, 2023).

Отдельного обсуждения требует влияние влагообеспечения в период вегетации на накопление белка и жира. В работе отмечена связь между показателями состава

семян и условиями увлажнения, что согласуется с данными исследований, рассматривающих климатические условия года как значимый фактор вариативности качества соевого зерна (Устарханова и соавт., 2019; Поморова и соавт., 2023). При этом возможные расхождения количественных оценок по сравнению с литературными источниками следует объяснять особенностями конкретных метеорологических сценариев исследуемых лет, а также сортоспецифичностью реакции на условия среды (Устарханова и соавт., 2019; Поморова и соавт., 2023). В методологическом отношении такой вывод подчеркивает необходимость аккуратного переноса результатов в практические рекомендации и недопустимость их универсализации вне контекста зоны и набора генотипов (Зайцев и соавт., 2020; Синеговская, 2023).

В прикладном плане результаты подтверждают целесообразность расширения исследований биохимического состава сортов сои различных групп спелости как элемента комплексной оценки их хозяйственной ценности. Представленная в работе дифференциация по белку и жиру и выделение сортов с целевыми качественными профилями формируют основу для предварительной сортовой ориентировки при выборе направления использования зерна (Зеленцов и соавт., 2023; Синеговская, 2023). Вместе с тем для окончательных выводов о стабильности качественного профиля и для более точной привязки к пищевому или кормовому назначению требуется подтверждение устойчивости наблюдаемых закономерностей в серии лет, что согласуется с работами, акцентирующими роль факторов среды и адаптивного потенциала генотипов (Зайцев и соавт., 2020; Устарханова и соавт., 2019).

Ограничения исследования

Настоящее исследование, ориентированное на анализ отдельных показателей биохимического состава зерна сои у сортов различных групп спелости, не позволяет в полном объеме охарактеризовать качество зерна как сырья для пищевого и кормового использования. В рамках примененного набора параметров остаются нераскрытыми ключевые компоненты, определяющие нутритивную и технологическую ценность продукции. В частности, более полная и содержательно обоснованная оценка качества требует включения данных по аминокислотному профилю белков и жирнокислотному составу масла, поскольку именно эти характери-

стики в значительной мере определяют функциональные свойства соевого сырья и его пригодность для различных направлений переработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании для условий Юга России выполнена сравнительная оценка сортов сои, относящихся к различным группам спелости, по показателям урожайности и биохимического состава зерна с учетом вариабельности климатических условий. В рамках проведенного анализа охарактеризованы параметры накопления белка и жира, а также элементы химического состава, включая содержание углеводов, безазотистых экстрактивных веществ и золы. Дополнительно определены технологически значимые показатели качества зерна, представленные массой 1000 семян и натурой.

По совокупности качественных характеристик установлены сортовые различия, позволяющие выделить генотипы с целевыми профилями. К наиболее высокобел-

ковым относятся среднеспелые сорта Вилана и Зара. Раннеспелые сорта Парус и Кора характеризуются как сорта со средним уровнем масличности. Наиболее сбалансированное сочетание белка и жира отмечено у сорта Зара. Этот же сорт отличается минимальной трипсинингибирующей активностью белков. Высокие значения натуре зерна выявлены у сортов Вилана и Зара, что повышает их технологическую привлекательность как сырья для переработки.

В целом результаты показывают, что раннеспелые и среднеспелые сорта в условиях опыта формировали более высокий урожай зерна по сравнению со скороспелыми. Полученная совокупность данных по продуктивности и качественным показателям зерна создает основу для более обоснованного сортового выбора при ориентировании производства на пищевые и кормовые направления использования и может быть использована для получения продукции с заранее заданными технологическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

- Белышкина, М.Е., Кобозева, Т.П., Заренкова, Н.В., Федорова, З.С., & Демьяненко, Е.В. (2024). Структура, продуктивность и кормовая ценность надземной биомассы сои северного экотипа в условиях Центрального Нечерноземья. *Агронаука*, 2(1), 5–15. <https://doi.org/10.24412/2949-2211-2024-2-1-5-1>
- Зайцев, Н.И., Ревенко, В.Ю., & Устарханова, Э.Г. (2020). Влияние погодных факторов на продуктивность перспективных линий сои в зоне неустойчивого увлажнения. *Масличные культуры*, 2(182), 62–69. <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2020-2-182-62-69>
- Зеленцов, С.В., Паспекhov, Д.И., Тевченков, А.А., & Мошненко, Е.В. (2023). Эколого-географическая оценка селекционных линий сои Краснодарской селекции в условиях Липецкой области. *Зернобобовые и крупяные культуры*, 3(47), 34–41. <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2023-3-34-41>
- Кодирова, Г.А., Загуменная, Г.В., & Низкий, Е.С. (2024). Межсортовые различия содержания олигосахаридов в зерне сои. *Аграрный вестник Урала*, 24(10), 1312–1321. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-10-1312-1321>
- Козлова, Е.И., Новак, М.А., & Яндьо, В.В. (2023). Региональные аспекты развития рынка сои на современном этапе. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 16(76), 213–220. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_1_213-220
- Литвиненко, О.В., и др. (2019). Перспективы использования новых сортов сои селекции Всероссийского НИИ сои в производстве соево-шоколадного напитка. *Вестник МГТУ*, 22(3), 413–420. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-3-413-420>
- Литвиненко, О.В., Кубанкова, Г.В., & др. (2023). Результаты сравнительного изучения сортов сои по показателям биохимического состава зерна. *Агронаука*, 1(4), 62–70. <https://doi.org/10.24412/2949-2211-1-4-62-70>
- Макаров, Д.В., Моргунов, Н.Л., Рудик, Ф.Я., Фоменко, О.С., & Семилет, Н.А. (2023). Разработка установки для инактивации зерна сои ультразвуком. *Агропромышленные технологии России*, 3(29), 116–128. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-29-116-128>

- Николаев, С.И., Даниленко, И.Ю., Карапетян, А.К., & Бубуёк, А.В. (2024). Сравнительная оценка химического и аминокислотного состава полножирной сои и зерна люпина. *Известия НВ АУК*, 5(77), 196–201. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-05-21>
- Поминов, А.В., Левкина, А.Ю., Бычкова, В. В., Гусева, С. А., Бабушкин, Д.Д., Носко, О.С., & Калинин, Ю. А. (2021). Биохимическая оценка показателей качества зерна сортообразцов сои мировой коллекции ВИР в условиях Нижневолжского региона. *АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал*, (6). <https://doi.org/10.51419/20216634>
- Поморова, Ю.Ю., Пятковский, В.В., & Серова, Ю.М. (2023). Биохимический состав семян сортов сои, возделываемых в различных регионах России, и аспекты его биологической ценности (обзор). *Масличные культуры*, 4(196), 84–96. <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2023-4-196-84-96>
- Речкина, Е.А., Кох, Ж.А., Ханипова, В.А., & Воробьева, А.В. (2024). Перспективы использования вторичного соевого сырья в пищевом производстве. *Ползуновский вестник*, (3), 36–40. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.005>
- Рустомова, А.Ж., & Ребезов, М.Б. (2023). Применение зернобобовой смеси для хлебобулочных изделий. *Аграрная наука*, 373(8), 137–142. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-373-8-137-1>
- Синеговская, В.Т. (2023). Вклад фундаментальных исследований в совершенствование селекционного процесса при создании сортов сои на Амуре. *Достижения науки и техники АПК*, 37(6), 5–11. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_6_5
- Скрипко, О.В. (2020). Изучение функционально-технологических свойств белково-витаминных и белково-углеводных добавок на основе сои. *Вестник КрасГАУ*, (3), 150–156. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-3-150-156>
- Тимошкин, О.А., Тимошкина, О.Ю., Данилов, М.В., & Фадеева, М.Ф. (2025). Новый скороспелый сорт сои для условий лесостепи Среднего Поволжья. Технические культуры. *Научный сельскохозяйственный журнал*, 2(5), 56–62. <https://doi.org/10.54016/SVITOK.2025.41.99.008>
- Устарханова, Э. Г., Мацола, Н. А., & Зайцев, Н. И. (2019). Новый среднеспелый сорт сои Зара. *Масличные культуры*, 3(179), 165–167. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.078>
- Шаймерденова, Д. А., Чаканова, Ж. М., Махамбетова, А. А., Исакова, Д. М., & Есмамбетов, А.А. (2019). Способы получения зерновых основ для продуктов питания. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 81(2), 230–238. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-2-230-238>
- Вишнякова, М.А., Сеферова, И.В., & Самсонова, М.Г. (2017). Требования к исходному материалу для селекции сои в контексте современных биотехнологий (обзор). *Сельскохозяйственная биология*, 52(5), 905–916. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.5.905rus>
- Корнева, Н.Ю., & Литвиненко, О.В. (2023). Оценка качественного состава зерна сои, пригодного для производства пищевых добавок. *Агронаука*, 1(1), 158–164. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-1-3-12>
- Banti, M. (2021b). Raffinose family oligosaccharides: Occurrence in food materials, nutritional implication and methods of analysis (Review). *World Journal of Food Science and Technology*, 5(3), 37. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20210503.112>
- Belobrajdic, D. P., James-Martin, G., Jones, D., & Tran, C. D. (2023b). Soy and gastrointestinal health: A review. *Nutrients*, 15(8), 1959. <https://doi.org/10.3390/nu15081959>
- Deng, Z., & Kim, S. W. (2024). Opportunities and challenges of soy proteins with different processing applications. *Antioxidants*, 13(5), 569. <https://doi.org/10.3390/antiox13050569>
- Eberhart, S. A., & Russell, W. A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6(1), 36–40. <https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183x000600010011x>
- Guo, B., Sun, L., Jiang, S., Ren, H., Sun, R., Wei, Z., Hong, H., Luan, X., Wang, J., Wang, X., Xu, D., Li, W., Guo, C., & Qiu, L. (2022). Soybean genetic resources contributing to sustainable protein production. *Theoretical and Applied Genetics*, 135(11), 4095–4121. <https://doi.org/10.1007/s00122-022-04222-9>
- Jamison, D. R., Chen, P., Hettiarachchy, N. S., Miller, D. M., & Shakiba, E. (2024). Identification of quantitative trait loci (QTL) for sucrose and protein content in soybean seed. *Plants*, 13(5), 650. <https://doi.org/10.3390/plants13050650>

- Kasprowicz-Potocka, M., Gulewicz, P., & Zaworska-Zakrzewska, A. (2022). The content of raffinose oligosaccharides in legumes and their importance for animals. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 31(3), 265–275. <https://doi.org/10.22358/jafs/149656/2022>
- Kohli, V., & Singha, S. (2024). Protein digestibility of soybean: How processing affects seed structure, protein and non-protein components. *Discover Food*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00076-w>
- Kumar, J., Anand, Srivastava, M. K., Amrath, P. K., & Sarkar, J. (2025). Soybean production technologies. *Soybean Production Technology*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8677-0_7
- Long, S., Ma, J., Piao, X., Li, Y., Rasmussen, S. H., & Liu, L. (2021). Enzyme-treated soybean meal enhanced performance via improving immune response, intestinal morphology and barrier function of nursery pigs in antibiotic-free diets. *Animals*, 11(9), 2600. <https://doi.org/10.3390/ani11092600>
- Priyanka, A. L., & Shankar, S. (2024). Comparative evaluation of the antioxidant property value of rosemary essential oil blend soy protein-based edible films with varying film thickness. *Interactions*, 245(1). <https://doi.org/10.1007/s10751-024-02055-0>
- Qin, J., Wang, F., Zhao, Q., Shi, A., Zhao, T., Song, Q., Ravelombola, W., An, H., Yan, L., Yang, C., & Zhang, M. (2022). Identification of candidate genes and genomic selection for seed protein in soybean breeding pipeline. *Frontiers in Plant Science*, 13, 882732. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.882732>
- Zheng, L., Regenstein, J. M., Zhou, L., & Wang, Z. (2022). Soy protein isolates: A review of their composition, aggregation, and gelation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1940–1957. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12925>
- Chu, X., Yuan, B., Li, C., Qian, X., Yao, Y., Qiao, J., Guo, D., & Wang, Z. (2025). Genome-wide analysis of the FAD gene family in *Solanum tuberosum* L. reveals its involvement in cold stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1736660>

REFERENCES

- Belyshkina, M.E., Kobozeva, T.P., Zarenkova, N.V., Fedorova, Z.S., & Dem'yanenko, E.V. (2024). Structure, productivity and feed value of above-ground soybean biomass of the northern ecotype in the conditions of the central Non-Black Earth Region. *Agroscience*, 2(1), 5–15. (in Russ.). <https://doi.org/10.24412/2949-2211-2024-2-1-5-15>
- Zaitsev, N.I., Revenko, V.Yu., & Ustarkhanova, E.G. (2020). Influence of weather factors on the productivity of perspective soybean lines in the unstable moisture zone. *Oil Crops*, 2(182), 62–69. (in Russ.). <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2020-2-182-62-69>
- Zelentsov, S.V., Paspekov, D.I., Tevchenkov, A.A., & Moshnenko, E.V. (2023). Ecological and geographical assessment of soybean breeding lines of Krasnodar breeding in the conditions of the Lipetsk region. *Legumes and Groat Crops*, 3(47), 34–41. (in Russ.). <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2023-3-34-41>
- Kodirova, G.A., Zagumennaya, G.V., & Nizkiy, S.E. (2024). Inter-varietal differences in soybean grain oligosaccharide content. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 24(10), 1312–1321. (in Russ.). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-10-1312-1321>
- Kozlova, E.I., Novak, M.A., & Yandyo, V.V. (2023). Regional aspects of soybean market development at the present stage. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*, 16(1), 213–220. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_1_213-220
- Litvinenko, O.V. et al. (2019). Prospects for using new soybean varieties breeding by All-Russian SRI of Soybean in the production of a soy-chocolate drink. *Vestnik of MSTU*, 22(3), 413–420. (In Russ.). <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-3-413-420>
- Litvinenko, O.V., Korneva, N.Yu., Kodirova, G.A., & Kubankova, G.V. (2023). Results of a comparative study of soybean varieties according to the biochemical composition of grain. *Agronauka. Agroscience*, 1(4), 62–70. (in Russ.). <https://doi.org/10.24412/2949-2211-1-4-62-70>

- Makarov, D.V., Morgunova, N.L., Rudik, F.Y., Fomenko, O.S., & Semilet, N.A. (2023). Development of an installation for inactivation of soybean grain by ultrasound. *Agro-industrial technologies of Central Russia*, 3(29), 116–128. (in Russ.). <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-29-116-128>
- Nikolaev, S.I., Danilenk, I.Y., Karapetyan, A.K., & Bubuyok, A.V. (2024). Comparative assessment of the chemical and amino acid composition of full-fat soybeans and lupine grain. *Proceedings of the Lower Volga Agro University Complex*, 5(77), 196–201. (in Russ.). <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-05-21>
- Pominov, A.V., Levkina, A.Yu., Bychkova, V.V., Guseva, S.A., Babushkin, D.D., Nosko, O.S., & Kalinin, Yu. A. (2021). Biochemical assessment of grain quality indicators of soybean varieties from the world collection of the All-Russian Research Institute of Plant Industry in the Lower Volga region. *AgroEcolInfo: Electronic Scientific and Production Journal*, (6). <https://doi.org/10.51419/20216634>
- Pomorova, Yu.Yu., Pyatovsky, V.V., & Serova, Yu.M., (2023). Biochemical composition of soybean seeds produced in various regions of Russia and aspects of its biological value (review). *Oil Crops*, 4(196), 84–96. (in Russ.). <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2023-4-196-84-96>
- Rechkina, E.A., Koch, Zh. A., Khanipova, V.A. & Vorobyeva, A.V. (2024). Prospects for use of secondary soy raw materials in food production. *Polzunovskiy Vestnik*, (3), 36–40. (in Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.005>
- Rustemova, A.Z., & Rebezov, M.B. (2023). The use of leguminous mixture for bakery products. *Agrarian Science*, 373(8), 137–142 (in Russ.). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-373-8-137-142>
- Sinegovskaya, V.T. (2023). The contribution of fundamental research to the improvement of the breeding process when creating soybean varieties on the Amur. *Achievements of Science and Technology in Agribusiness*, 37(6), 5–11. (in Russ.). https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_6_5
- Skripko, O.V. (2020). The study of functional and technological properties of proteinaceous and vitamin and proteinaceous carbohydrate additives on the basis of soy. *KrasGAU Bulletin*, (3), 150–156. (in Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-3-150-156>
- Timoshkin, O.A., Timoshkina, O.Yu., Danilov, M.V., & Fadeev, M.F. (2025). New early maturing soybean variety for forest-steppe conditions of the Middle Volga region. *Technical Crops. Scientific Agricultural Journal*, 2(5), 56–62. <https://doi.org/10.54016/SVITOK.2025.41.99.008>
- Ustarkhanova, E.G., Matsola, N.A., & Zaitsev, N.I. (2019). New mid-season soybean variety Zara. *Oil Crops*, 3(179), 165–167. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.078>
- Shaimerdenova, D.A., Chakanova, J.M., Mahambetova, A.A., Iskakova, D.M., & Yesmambetov A.A. (2019). Methods for obtaining grain bases for food. *Vestnik VGUIT*, 81(2), 230–238. (in Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-2-230-238>
- Vishnyakova, M.A., Seferova, I.V., & Samsonova, M.G. (2017). Requirements for the initial material for soybean breeding in the context of modern biotechnology (review). *Agricultural Biology*, 52(5), 905–916. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.5.905rus>
- Korneva, N.Yu., & Litvinenko, O.V. (2023). Evaluation of the qualitative composition of soybean grain suitable for the production of food additives. *Agronauka. Agrosien*, 1(1), 158–164. (in Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-1-3-12>
- Banti, M. (2021). Raffinose family oligosaccharides: Occurrence in food materials, nutritional implication and methods of analysis (Review). *World Journal of Food Science and Technology*, 5(3), 37. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20210503.112>
- Belobrajdic, D. P., James-Martin, G., Jones, D., & Tran, C. D. (2023). Soy and gastrointestinal health: A review. *Nutrients*, 15(8), 1959. <https://doi.org/10.3390/nu15081959>
- Deng, Z., & Kim, S. W. (2024). Opportunities and challenges of soy proteins with different processing applications. *Antioxidants*, 13(5), 569. <https://doi.org/10.3390/antiox13050569>
- Eberhart, S. A., & Russell, W. A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6(1), 36–40. <https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183x000600010011x>

- Guo, B., Sun, L., Jiang, S., Ren, H., Sun, R., Wei, Z., Hong, H., Luan, X., Wang, J., Wang, X., Xu, D., Li, W., Guo, C., & Qiu, L. (2022). Soybean genetic resources contributing to sustainable protein production. *Theoretical and Applied Genetics*, 135(11), 4095–4121. <https://doi.org/10.1007/s00122-022-04222-9>
- Jamison, D. R., Chen, P., Hettiarachchy, N. S., Miller, D. M., & Shakiba, E. (2024). Identification of quantitative trait loci (QTL) for sucrose and protein content in soybean seed. *Plants*, 13(5), 650. <https://doi.org/10.3390/plants13050650>
- Kasprowicz-Potocka, M., Gulewicz, P., & Zaworska-Zakrzewska, A. (2022). The content of raffinose oligosaccharides in legumes and their importance for animals. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 31(3), 265–275. <https://doi.org/10.22358/jafs/149656/2022>
- Kohli, V., & Singha, S. (2024). Protein digestibility of soybean: How processing affects seed structure, protein and non-protein components. *Discover Food*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00076-w>
- Kumar, J., Anand, Srivastava, M. K., Amrath, P. K., & Sarkar, J. (2025). Soybean production technologies. *Soybean production technology*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8677-0_7
- Long, S., Ma, J., Piao, X., Li, Y., Rasmussen, S. H., & Liu, L. (2021). Enzyme-treated soybean meal enhanced performance via improving immune response, intestinal morphology and barrier function of nursery pigs in antibiotic-free diets. *Animals*, 11(9), 2600. <https://doi.org/10.3390/ani11092600>
- Priyanka, A. L., & Shankar, S. (2024). Comparative evaluation of the antioxidant property value of rosemary essential oil blend soy protein-based edible films with varying film thickness. *Interactions*, 245(1). <https://doi.org/10.1007/s10751-024-02055-0>
- Qin, J., Wang, F., Zhao, Q., Shi, A., Zhao, T., Song, Q., Ravelombola, W., An, H., Yan, L., Yang, C., & Zhang, M. (2022). Identification of candidate genes and genomic selection for seed protein in soybean breeding pipeline. *Frontiers in Plant Science*, 13, 882732. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.882732>
- Zheng, L., Regenstein, J. M., Zhou, L., & Wang, Z. (2022). Soy protein isolates: A review of their composition, aggregation, and gelation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1940–1957. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12925>
- Chu, X., Yuan, B., Li, C., Qian, X., Yao, Y., Qiao, J., Guo, D., & Wang, Z. (2025). Genome-wide analysis of the FAD gene family in *Solanum tuberosum* L. reveals its involvement in cold stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1736660>

ОБ АВТОРЕ

Шабалдас Ольга Георгиевна, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор, базовой кафедры общего земледелия, растениеводства, селекции и семеноводства имени проф. Ф.И. Бобрышева Ставропольского государственного аграрного университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0001-5606-1855>, Scopus ID 57188726793, Researcher ID: KQU-0174-2024, SPIN-код: 7835-9355, AuthorID: 475997, shabaldas-olga@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Shabaldas Olga Georgievna, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Professor, Basic Department of General Agriculture, Crop Production, Breeding, and Seed Production named after Prof. F.I. Bobryshev of the Stavropol State Agrarian University (355017, Russian Federation, Stavropol, per. Zootechnical, 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0001-5606-1855>, Scopus ID 57188726793, Researcher ID: KQU-0174-2024, SPIN-код: 7835-9355, AuthorID: 475997, shabaldas-olga@mail.ru