



FOOD METAENGINEERING

Пищевая Метаинженерия

Volume 4 | Issue 2 | 2026



FOOD METAENGINEERING

Научный рецензируемый журнал
No 2 | 2026
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

FOOD METAENGINEERING

Scientific peer-reviewed journal
No 2 | 2026
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

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 — ассоциированный 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 Institute, 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. Gorbатов, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

ОРИГИНАЛЬНОЕ ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Д.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

Кинетика деградации молочной продукции и выбор направлений переработки
на основе критических биомаркеров 7

Е.Д. Рожнов, М.Н. Школьников, О.Н. Мусина

Разработка рецептур инстантных смузи на основе ферментализованного тыквенного пюре
и продуктов переработки дикоросов25

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

Е.М. Серба

Пищевая биотехнология: инновационные методы, микроорганизмы и их потенциал (аналитический обзор)42

Е.А. Лаптева

Жировая фаза пищевых систем: критический обзор влияния состава и соотношения животных
и растительных жиров на липидный обмен и кардиометаболические показатели62

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

Молекулярно-генетические методы видовой идентификации молока: обзор предметного поля.....76

ORIGINAL EMPIRICAL RESEARCH

- Dmitry S. Ryskin, Vladislav K. Semipyatniy, Elena E. Illarionova, Daria V. Klimova, Anastasia V. Kosareva, Konstantin E. Anufriev, Anastasia E. Ryabova**
 Degradation Kinetics of Dairy Products and Selection of Processing Strategies Based on Critical Biomarkers..... 8
- Evgeny D. Rozhnov, Marina N. Shkolnikova, Olga N. Musina**
 Development of Instant Smoothie Formulations Based on Enzyme-Hydrolyzed Pumpkin Purée and Processed Wild-Growing Berries26

SCOPING REVIEW

- Elena M. Serba**
 Food Biotechnology: Innovative Methods, Microorganisms, and Their Potential (An Analytical Review)43
- Elena A. Lapteva**
 The Fat Phase of Food Systems: A Critical Review of the Effects of the Composition and Ratio of Animal and Vegetable Fats on Lipid Metabolism and Cardiometabolic Markers63
- Alexey V. Khan, Ekaterina G. Lazareva, Daria D. Koval, Oleg Yu. Fomenko**
 Molecular Genetic Methods for Species Identification of Milk: A Scoping Review77

Кинетика деградации молочной продукции и выбор направлений переработки на основе критических биомаркеров

Д.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

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

АННОТАЦИЯ

Введение: Молочная продукция с предельным сроком годности формирует поток пищевых отходов, однако ее переработка затруднена вариабельностью состава и степени деградации. Существующие схемы валоризации (жироотделение, ферментация, анаэробное сбраживание, сушка) ориентированы на однородные потоки и недостаточно учитывают особенности смешанных молочных систем, что ограничивает возможность обоснованного выбора маршрута переработки.

Цель: Выявить критические параметры деградации смешанных молочных систем с предельным сроком годности и разработать на их основе алгоритмические принципы для интеллектуальной системы сортировки, обеспечивающей выбор оптимального направления переработки.

Материалы и методы: Объектами исследования являлись сливки, сметана, кефир и их бинарные смеси 50/50 жирностью 2,5–15 %, срок хранения 90–120 % от рекомендованного производителем. Проведен полнофакторный эксперимент ускоренного хранения при $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$ с отбором проб через 0, 72 и 144 ч. Определяли pH, титруемую кислотность, условную вязкость, лактозу, показатели жировой фазы (перекисное и кислотное числа, жирнокислотный состав) и профиль органических кислот. Для экстраполяции на хранение при 5°C использовали модель Аррениуса, а для унификации потоков – регрессионный и кластерный анализ.

Результаты: Скорость деградации определялась исходной матрицей и долей ферментированных компонентов. Наиболее выраженные изменения выявлены в сливках и смесях со сливками: кислотность сливок выросла с 16 до 136°T , pH снизился на 2,9 единицы, а условная вязкость увеличилась более чем в 100 раз, что свидетельствует о развитии кислотной коагуляции и гелеобразования. Сметана характеризовалась наибольшей стабильностью, кефир — высокой начальной кислотностью и выраженным кислотонакоплением. В жировой фазе зафиксирован рост перекисного числа до 5,1–6,6 мэкв $\text{O}_2/\text{кг}$ и кислотного числа до 1,7–2,2 мг КОН/г. Регрессионные модели позволили прогнозировать изменения этих показателей по составу смеси и времени хранения. Накопление молочной кислоты при наличии остаточной лактозы указывает на потенциал кислотной валоризации, тогда как содержание летучих жирных кислот более 1000 мг/л может служить основанием для перенаправления сырья после жироотделения на анаэробное сбраживание. Кластеризация по жирнокислотному составу позволила выделить 4 устойчивые группы образцов, пригодные для унификации партий.

Выводы: Деградационные изменения молочной продукции с предельным сроком годности рассматриваются как совокупность критических биомаркеров, позволяющих соотносить состояние сырья с рациональным маршрутом переработки. Предложенный подход может быть использован для интеллектуальной сортировки, предварительной оценки и маршрутизации продукции, выведенной из стандартного оборота, на этапах хранения, логистики и переработки, создавая основу для обоснованной валоризации неоднородных молочных потоков и снижения потерь ценных компонентов.

Ключевые слова: молочная продукция с предельным сроком годности, критические биомаркеры, валоризация, ускоренное хранение, интеллектуальная сортировка, молочные отходы

Корреспонденция:

Климова Дарья Владимировна
E-mail: d_klimova@vniimi.org

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 14.01.2026

Принята: 15.06.2026

Опубликована: 30.06.2026

Финансирование:

Публикация подготовлена
в рамках государственного
задания FNSS-2025-0006.

Copyright: © 2026 Авторы



Для цитирования: Рыскин, Д.С., Семипятный, В.К., Илларионова, Е.Е., Климова, Д.В., Косарева, А.В., Ануфриев, К.Э., & Рябова, А.Е. (2026). Кинетика деградации молочной продукции и выбор направлений переработки на основе критических биомаркеров. *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 07–24.
<https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.112>

Degradation Kinetics of Dairy Products and Selection of Processing Strategies Based on Critical Biomarkers

Dmitry S. Ryskin, Vladislav K. Semipyatniy, Elena E. Illarionova, Daria V. Klimova, Anastasia V. Kosareva,
Konstantin E. Anufriev, Anastasia E. Ryabova

All-Russian Dairy Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: Dairy products near or beyond the end of their recommended shelf life form a stream of food waste, yet their processing is hampered by compositional variability and different degrees of degradation. Existing valorization schemes, including fat separation, fermentation, anaerobic digestion, and drying, are mainly designed for homogeneous streams and do not sufficiently account for the specific features of mixed dairy systems, which limits the evidence-based selection of an appropriate processing route.

Purpose: To identify critical degradation parameters of mixed dairy systems near or beyond the end of their recommended shelf life and to develop algorithmic principles for an intelligent sorting system that supports the selection of a rational processing route.

Materials and Methods: The study objects were cream, sour cream, kefir, and their 50:50 binary mixtures, with fat contents ranging from 2.5 to 15 % and stored for 90–120 % of the manufacturer-recommended shelf life. A full-factorial accelerated storage experiment was conducted at $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$, with sampling after 0, 72, and 144 h. The following parameters were determined: pH, titratable acidity, apparent viscosity, lactose content, fat-phase characteristics (peroxide value, acid value, and fatty acid composition), and organic acid profile. The Arrhenius model was used to extrapolate the results to storage at 5°C , while regression and cluster analyses were applied to group and standardize raw material streams.

Results: The degradation rate was determined by the initial matrix and the proportion of fermented components. The most pronounced changes were observed in cream and cream-containing mixtures: the titratable acidity of cream increased from 16 to 136°T (degrees of titratable acidity used in Russian dairy practice), pH decreased by 2.9 units, and apparent viscosity increased more than 100-fold, indicating acid coagulation and gel formation. Sour cream showed the greatest stability, whereas kefir was characterized by high initial acidity and pronounced acid accumulation. In the fat phase, the peroxide value increased to 5.1–6.6 meq O_2/kg and the acid value to 1.7–2.2 mg KOH/g. The regression models made it possible to predict changes in these parameters as a function of mixture composition and storage time. Lactic acid accumulation in the presence of residual lactose indicates the potential for lactic acid valorization, whereas a volatile fatty acid content above 1000 mg/L may serve as a criterion for redirecting the raw material, after fat separation, to anaerobic digestion. Cluster analysis based on fatty acid composition identified four stable sample groups suitable for batch standardization.

Conclusion: Degradation changes in dairy products near or beyond the end of their recommended shelf life can be interpreted as a set of critical biomarkers that relate the condition of the raw material to a rational processing route. The proposed approach can be used for intelligent sorting, preliminary assessment, and routing of dairy products withdrawn from standard circulation at the stages of storage, logistics, and processing. This creates a basis for evidence-based valorization of heterogeneous dairy streams and for reducing losses of valuable components.

Keywords: dairy products at the end of their shelf life, critical biomarkers, valorization, accelerated storage, intelligent sorting, dairy waste

Correspondence:

Daria V. Klimova

E-mail: d_klimova@vnimi.org

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 14.01.2026

Accepted: 15.06.2026

Published: 30.06.2026

Funding:

The publication was prepared within the framework of state assignment FNSS-2025-0006.

Copyright: © 2026 The Authors



To cite: Ryskin, D.S., Semipyatny, V.K., Illarionova, E.E., Klimova, D.V., Kosareva, A.V., Anufriev, K.E., & Ryabova, A.E. (2026). Degradation kinetics of dairy products and selection of processing strategies based on critical biomarkers. *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 07–24. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.112>

ВВЕДЕНИЕ

Потери и отходы пищевой продукции остаются одной из ключевых проблем современной продовольственной системы. По оценке продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО ООН), ежегодно в мире теряется или выбрасывается около трети произведенных пищевых продуктов, что эквивалентно примерно 1,3 млрд тонн в год (Цавкелова и др., 2012). Для молочной отрасли эта проблема имеет особую значимость в силу высокой скоропортимости продукции, ограниченного срока годности и высокой ресурсоемкости ее производства. При этом, в менее развитых странах основные потери формируются на стадиях сбора, хранения, переработки и транспортировки, тогда как в более развитых — на стадиях реализации и конечного потребления (Saini et al., 2021). Дополнительная актуальность проблемы обусловлена экологической нагрузкой молочной отрасли, поскольку молочное животноводство вносит заметный вклад в антропогенные выбросы метана (около 4%) (Wang and Zhao, 2022), а побочные продукты переработки молока и нереализованная продукция при нерациональном обращении могут вызывать неблагоприятные изменения водных экосистем вследствие высокой кислотности и высокой биохимической потребности в кислороде (Udourioh et al., 2025). В этих условиях молочная продукция с истекшим или близким к истечению сроком годности должна рассматриваться не только как отход, но и как неоднородный вторичный ресурс, требующий научно обоснованного выбора направления переработки (Балабанова и др., 2014).

Начиная с 2015 года, исследования в области переработки молочных отходов смещаются от изолированных технологических решений к концепции интегрированных биоперерабатывающих комплексов, в которых один поток сырья последовательно используется для получения нескольких целевых продуктов (Mao et al., 2015; Wu et al., 2023). К числу наиболее изученных направлений валоризации относятся извлечение жировой фракции, в частности сепарация молочного жира с последующей трансэтерификацией для получения биодизельного топлива (Andrewes, 2022), получение органических кислот, включая производство оптически чистой молочной кислоты из обезжиренного остатка (Arise et al., 2022), анаэробный метаногенез, а также сушка с получением стабильных продуктов или полуфабрикатов (Волкова, 2002; Михеева и др., 2020). Такой

подход позволяет повысить полноту использования сырья и улучшить экономику переработки, однако эффективность конкретного маршрута существенно зависит от состава исходной молочной матрицы, степени ее микробиологической и биохимической деградации, а также соотношения компонентов в смешанных системах. Наиболее заметно эта зависимость проявляется при рассмотрении отдельных технологических направлений валоризации.

Одним из основных путей валоризации жидких молочных отходов является сушка, позволяющая перевести нестабильную высоковлажную систему в более устойчивую форму. Так, распылительная сушка может использоваться для получения стабильных и микробиологически безопасных кормовых концентратов, включая сухую пахту с содержанием белка около 32 % и жира около 6 % (Бабаев и др., 2011). Однако, данный путь остается высокоэнергоемким, что существенно ограничивает его экономическую эффективность (Kalibekkyzy et al., 2026). Современные исследования и обзоры показывают, что перспективным направлением является совершенствование сушильных технологий, в том числе с использованием энергоэффективных режимов и альтернативных теплоносителей (Волкова, 2002). Вместе с тем даже при технологической модернизации сушка требует достаточно однородного входного потока и не всегда оказывается рациональной для разнонаправленно деградированной молочной продукции. Кроме того, при использовании переработанных потоков в кормовых целях возникают дополнительные требования к стабильности состава и нормативному регулированию. На этом фоне особый интерес представляют технологии, позволяющие предварительно выделять наиболее ценные компоненты молочного сырья.

Другим значимым направлением валоризации является выделение жировой фракции. Молочные продукты некондиционные или с предельным сроком годности содержат значительное количество молочного жира, который при соответствующем состоянии может быть использован на пищевые или технические цели (Cai et al., 2010). При этом способ извлечения жира принципиально влияет на дальнейшую пригодность обезжиренного остатка к последующей переработке. Механические методы предпочтительны на ранних стадиях деградации, когда важно сохранить нативные свойства компонентов матрицы, тогда как более жесткие химические методы обеспечивают более полное извлечение, но сопровождаются более выраженной деструк-

цией сопутствующих веществ (Cai et al., 2010; Nayik and Ranade, 2025). В связи с этим оценка состояния сырья оказывается важной и для выбора последующих биотехнологических маршрутов.

Одним из наиболее исследованных способов утилизации пищевых отходов является анаэробный метаногенез. Высокая концентрация макронутриентов делает отходы молочной отрасли энергетически ценным субстратом для получения биогаза (Antonelli et al., 2016; Narisetty et al., 2022; Udourioh et al., 2025). Так, при анаэробной переработке 1 м³ подсырной сыворотки может образовываться до 20,5 м³ метана (Ergüder et al., 2001). В то же время молочное сырье характеризуется высокой биodeградируемостью, низкой буферной емкостью и склонностью к быстрому накоплению промежуточных продуктов ацидогенеза, прежде всего летучих жирных кислот, что повышает риск ингибирования метаногенеза (Панов и др., 2013; Al-Jumaily et al., 2023; Guzel-Seydim et al., 2011; Krause et al., 2008). Современные исследования подчеркивают, что устойчивость процесса определяется не только общим содержанием органики, но и составом субстрата, скоростью его предварительной деградации и накоплением ингибирующих метаболитов (Al-Jumaily et al., 2023; Krause et al., 2008). Эти же факторы имеют значение и для других вариантов биоконверсии молочного сырья.

Отдельный интерес представляет возможность направленной биоконверсии молочного сырья в молочную кислоту. В обзоре (Arise et al., 2022) показано, что сыворотка и пермеаты являются перспективными лактозосодержащими субстратами для ферментационного получения молочной кислоты с использованием молочнокислых бактерий. Для смешанных молочных систем значимость этого направления определяется тем, что состав и степень кислотонакопления в процессе хранения влияют как на возможность дальнейшей ферментационной переработки, так и на выбор иных маршрутов валоризации, включая анаэробное сбраживание.

Несмотря на заметный прогресс в разработке отдельных технологий валоризации, обзор 2025 г. подчеркивает, что масштабное внедрение таких решений по-прежнему сдерживается рядом взаимосвязанных ограничений (Guzel-Seydim et al., 2000). Одно из них связано с организацией сбора и логистики: фермы, перерабатывающие заводы и розничные точки географически рассредоточены, что повышает затраты на транспортировку сырьевых потоков к единому биоперерабатывающему центру.

Не менее важны ограничения научно-технологического характера. Сложный и вариабельный состав молочных отходов, особенно смесей продукции с предельным сроком годности, затрудняет прогнозирование эффективности различных методов биоконверсии, поскольку продукты деградации и потенциально ингибирующие компоненты могут по-разному влиять на процессы ферментации и анаэробного сбраживания (Михеева и др., 2020; Al-Jumaily et al., 2023; Krause et al., 2008). Дополнительные трудности связаны с тем, что подбор и адаптация микробных культур к таким субстратам остаются недостаточно отработанными (Михеева и др., 2020), а энергетическая и экономическая эффективность многих схем валоризации без применения инструментов моделирования и методов машинного обучения все еще не обеспечивает достаточной отдачи, что снижает их инвестиционную привлекательность по сравнению с более простыми способами утилизации.

В этом контексте особую значимость приобретают исследования, направленные на установление взаимосвязей между степенью деградации молочного сырья, его составом и оптимальным технологическим маршрутом переработки. Одним из возможных решений представляется интеллектуальная система сортировки, основанная на прогнозных моделях и позволяющая дифференцировать сырьевые потоки по их пригодности к жироотделению, ферментации, анаэробному сбраживанию или сушке. Для разработки такой системы необходимо изучение кинетики порчи смешанных молочных систем с использованием модели Аррениуса, выявление критических физико-химических и биохимических маркеров деградации (кислотность, вязкость, окислительные показатели, профиль органических и жирных кислот), а также применение многомерных статистических методов для классификации сырья и прогнозирования его поведения при переработке.

Целью настоящего исследования являлось определение критических параметров деградации смешанных молочных систем с предельным сроком годности и разработка на их основе алгоритмических принципов для интеллектуальной системы сортировки, обеспечивающей выбор оптимального направления переработки. Предполагалось, что скорость и характер деградации таких систем зависели от исходной матрицы и соотношения компонентов, а совокупность выбранных биомаркеров могла быть использована для прогнозирования технологически целесообразного маршрута валоризации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Исследование заключалось в проведении полнофакторного эксперимента ускоренного хранения молочных систем с целью оценки кинетики их деградации и выявления критических биомаркеров для последующей классификации сырья по направлениям переработки. Дизайн исследования включал два фактора: состав молочной системы с шестью уровнями — сливки, сметана, кефир и их бинарные смеси в массовом соотношении 50/50 (сливки со сметаной, сливки с кефиром и сметана с кефиром) — и продолжительность ускоренного хранения с тремя уровнями.

Отбор образцов для анализов производился в трех точках контроля: в начале эксперимента (0 ч), а также через 72 и 144 ч хранения при температуре $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$. В каждой точке контроля определяли физико-химические и реологические показатели, характеристики жировой фазы и профиль органических кислот. Для экстраполяции полученных результатов на условия холодильного хранения использовали модель Аррениуса, для унификации сырьевых потоков и выбора направления переработки — регрессионный и кластерный анализ.

Объекты исследования

Объектами исследования являлись непереработанные молочные продукты с истекшим или близким к истечению сроком годности, потенциально пригодные для вторичной переработки: сливки, сметана и кефир, а также их бинарные смеси. Исходные продукты имели срок годности 90–120 % от рекомендованного производителем.

В соответствии с планом эксперимента были сформированы шесть модельных композиций, включающих индивидуальные продукты — сливки с массовой долей жира 10%, сметану с массовой долей жира 15% и кефир с массовой долей жира 2,5%, а также их бинарные смеси в массовом соотношении 50/50, которые моделируют состав сырьевых смесей, образующихся при переработке молочной продукции. Расчетная массовая доля жира в смесях составила: для сливок со сметаной — 12,5%, для сливок с кефиром — 6,25%, для сметаны с кефиром — 8,75%.

Масса каждого образца составляла 150 г. При наличии визуальной неоднородности образцы предварительно перемешивали при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение 30 с с использованием цифровой магнитной мешалки

TP-350+ с подогревом (MIULab, Китай), после чего укупоривали в стерильные пластиковые контейнеры.

Процедура исследования

Условия ускоренного хранения

Для моделирования ускоренной деградации образцы хранили при температуре $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$ в течение 144 ч. Указанный температурный режим выбран для интенсификации микробиологических и химических процессов при сохранении механизмов деградации, характерных для реальных условий хранения.

Хранение проводили в термостате суховоздушном тв-80–1–»ПЗ-К» УХЛ4.2 (Касимовский приборный завод, Россия) в закрытых пластиковых контейнерах при отсутствии света без контроля влажности. Отбор проб осуществляли в начале эксперимента (фоновый образец) и через 72 и 144 ч хранения.

Аналитические методы

Физико-химические показатели

В процессе хранения определяли активную кислотность (рН), титруемую кислотность ($^\circ\text{T}$) и массовую долю лактозы.

Активную кислотность определяли по ГОСТ 32892–2014 посредством потенциометрического измерения активности ионов водорода с использованием рН-метра Aquasearcher TM AB33PH-B с электродом Starter ST230 (Ohaus Corporation, США).

Титруемую кислотность определяли по ГОСТ 3624–92.

Массовую долю лактозы определяли по ГОСТ Р 54667–2011 с использованием сахариметра СУ-4 (НПО «Аналитприбор», Украина).

Реологические показатели

Реологические свойства образцов оценивали ротационным методом с применением ротационного вискозиметра Brookfield DV-II+Pro (Brookfield Engineering Laboratories, Inc., USA) со шпинделем RV3 при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и частоте вращения 80 об/мин.

Показатели жировой фазы

и профиль органических кислот

Для оценки состояния липидной фазы определяли перекисное число (PV) (мэкв $\text{O}_2/\text{кг}$), кислотное число (AV) (мг KOH/г) и жирнокислотный состав.

У.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

Жировую фазу выделяли по ГОСТ 31933–2012, пункт 3 с применением газового хроматографа «Кристаллюкс 4000М» исполнение 2 (ООО НПФ «Мета-хром», Россия) с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой.

Перекисное число определяли по ГОСТ Р 51487–99.

Кислотное число определяли по ГОСТ 31648–2022 посредством растворения выделенной из образцов жировой фракции в спиртохлороформной смеси с последующим титрованием свободных жирных кислот спиртовым раствором гидроокиси калия в присутствии индикатора фенолфталеина.

Содержание органических кислот (молочной, лимонной, муравьиной, янтарной и уксусной) определяли методом капиллярного электрофореза по методике М 04–47–2012 на системе «Капель-205» (ООО «Люмекс-Маркетинг», г. Санкт-Петербург, Россия, заводской № 3077) с электрофоретическим разделением в кварцевом капилляре и фотометрическим (косвенным) детектированием при 254 нм. Обработку данных проводили в программном обеспечении «Эльфوران» (ООО «Люмекс», Россия).

Жирнокислотный состав определяли по ГОСТ 32915–2014 с применением газового хроматографа «Кристаллюкс 4000М» исполнение 2 (ООО НПФ «Мета-хром», Россия).

Кинетическое моделирование и экстраполяция сроков хранения

Для экстраполяции результатов ускоренного хранения на условия холодильного хранения использовали классическую модель Аррениуса, согласно формуле (1):

$$k(T) = A \times \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (1)$$

где E_a — энергия активации, принятая равной 66,7 кДж·моль⁻¹ как верхняя граница диапазона процессов, лимитирующих качество питьевого и ферментированного молока и характерная для липидного окисления (Hassan and Nelson, 2012); R — универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж·моль⁻¹·К⁻¹; T — абсолютная температура хранения, К.

Соотношение констант скоростей деградации при температурах 32 и 5 °С рассчитывали по формуле (2):

$$\frac{k_{32}}{k_5} = \exp\left(-\frac{E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T_{32}} - \frac{1}{T_5}\right)\right), \quad (2)$$

где k_{32} и k_5 — эффективные константы скорости деградации при 32 и 5 °С соответственно; $T_{32} = 305,15$ К, $T_5 = 278,15$ К.

При допущении линейного накопления дефектов степень деградации считали пропорциональной $k(T)$. Эквивалентное время хранения при 5 °С рассчитывали по формуле (3):

$$t_5 = t_{32} \frac{k_{32}}{k_5}. \quad (3)$$

Для промышленной интерпретации результатов в модели интеллектуальной сортировки был введен коэффициент запаса 1,2 (Lu et al., 2019), учитывающий вариабельность сырья и температурные колебания в логистической цепочке.

Статистический и кластерный анализ

Все измерения выполняли в трех повторностях. Результаты представляли как среднее значение ± стандартное отклонение. Статистическую значимость различий оценивали при уровне $p < 0,05$, с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), а для многомерных данных — пермутационного дисперсионного анализа PERMANOVA (на базе 999 пермутаций). Для детализации парных различий между группами применялся post-hoc тест Тьюки (HSD). Статистическую обработку проводили в Python 3.11 (библиотеки pandas, matplotlib, scipy, scikit-learn; разработчик — Python Software Foundation, США), а также использовали Microsoft Excel (Microsoft, США), Wolfram Mathematica (Wolfram Research, США) и ObservableHQ (Observable, Inc., США).

Перед кластерным анализом данные по жирнокислотному составу подвергали Z-нормализации. Иерархическую кластеризацию выполняли по методу Уорда с использованием евклидовой метрики. В качестве алгоритма агломеративной кластеризации выбран метод Уорда (минимальной дисперсии), целью которого является минимизация общего внутрикластерного разброса (суммы квадратов отклонений) на каждом шаге объединения. Математически расстояние (меру связи) между двумя кластерами A и B определяют как увеличение суммы квадратов ошибок после их слияния:

$$D(A, B) = \frac{n_A n_B}{n_A + n_B} \times \|\mu_A - \mu_B\|^2, \quad (4)$$

где n_A и n_B — количество объектов в кластерах A и B ; μ_A и μ_B — векторы средних значений (центроиды) кластеров.

На каждом шаге алгоритма объединяются те два кластера, для которых значение $D(A, B)$ минимально, что обеспечивает формирование компактных и однородных групп объектов. Визуализация результатов проводилась в виде дендрограммы.

Анализ применяли для унификации входного сырья и формирования сценариев технологического рециклинга в рамках интеллектуальной системы сортировки. Для показателей жировой фазы строили регрессионные модели зависимости PV и AV от состава смеси и времени хранения. Использовали Python 3.11 с библиотеками scikit-learn и pandas, а также Wolfram Mathematica для аналитического описания регрессионных и кинетических уравнений. Тип модели — множественная полиномиальная регрессия (включающая линейные члены, квадратичные члены и члены взаимодействия).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Кинетика физико-химической деградации молочных систем

В ходе ускоренного хранения при $32 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 144 ч зафиксирована выраженная деградация большинства исследованных систем (Таблица 1). Наиболее интенсивные изменения наблюдались в образцах с высокой массовой долей лактозы и низкой начальной кислотностью — прежде всего в сливках и в смесях сливки-кефир. Так, за 144 ч титруемая кислотность сливок возросла с 16 до 136°T , то есть в 8,5 раза, $p < 0,05$, pH снизился на 2,9 единицы, а условная вязкость увеличилась более чем в 100 раз (с 6,08 до 790 с).

Напротив, сметана демонстрировала наибольшую коллоидную стабильность: изменения pH и титруемой кислотности были статистически менее выраженными, а значит, допустимый интервал ее технологическо-

Таблица 1

Физико-химические показатели образцов в динамике ускоренного хранения

Table 1

Physicochemical Parameters of Samples During Accelerated Storage

Образец	Время хранения, ч	Условная вязкость, с	pH	Титруемая кислотность, °T	Массовая доля лактозы, %
Сл	0	$6,08 \pm 0,91^a$	$6,50 \pm 0,97^a$	$16 \pm 2,40^a$	$4,49 \pm 0,67^a$
	72	$560,00 \pm 84,00^b$	$4,11 \pm 0,62^b$	$96 \pm 14,40^b$	$3,80 \pm 0,57^b$
	144	$790,00 \pm 118,50^b$	$3,60 \pm 0,54^c$	$136 \pm 20,40^c$	$3,45 \pm 0,52^b$
См	0	Высокая	$4,39 \pm 0,66^a$	$78 \pm 11,70^a$	$4,08 \pm 0,61^a$
	72	Высокая	$4,18 \pm 0,63^{ab}$	$85 \pm 12,75^{ab}$	$3,86 \pm 0,58^{ab}$
	144	Гелеобразование	$4,07 \pm 0,61^b$	$89 \pm 13,35^b$	$3,75 \pm 0,56^b$
К	0	$47,00 \pm 7,05^a$	$4,20 \pm 0,63^a$	$96 \pm 14,40^a$	н/д
	72	$39,00 \pm 5,85^{ab}$	$4,06 \pm 0,61^a$	$131 \pm 19,65^b$	н/д
	144	$35,00 \pm 5,25^b$	$3,99 \pm 0,60^a$	$149 \pm 22,35^b$	н/д
СлСм	0	$8,34 \pm 1,25$	$5,28 \pm 0,79^a$	$50 \pm 7,50^a$	$3,91 \pm 0,59^a$
	72	Высокая	$4,35 \pm 0,65^b$	$74 \pm 11,10^{ab}$	$3,81 \pm 0,57^a$
	144	Гелеобразование	$3,88 \pm 0,58^c$	$86 \pm 12,90^b$	$3,76 \pm 0,56^a$
СлК	0	$7,12 \pm 1,07^a$	$5,27 \pm 0,79^a$	$55 \pm 8,25^a$	$5,05 \pm 0,76^a$
	72	$68,00 \pm 10,20^b$	$3,85 \pm 0,58^b$	$150 \pm 22,50^b$	$3,99 \pm 0,60^b$
	144	$96,00 \pm 14,40^c$	$3,50 \pm 0,53^b$	$198 \pm 29,70^b$	$3,46 \pm 0,52^b$
СмК	0	$290,00 \pm 43,50^a$	$4,30 \pm 0,64^a$	$94 \pm 14,10^a$	$4,41 \pm 0,66^a$
	72	$210,00 \pm 31,50^b$	$3,91 \pm 0,59^b$	$138 \pm 20,70^b$	$3,34 \pm 0,50^b$
	144	$213,00 \pm 25,50^b$	$3,71 \pm 0,56^b$	$160 \pm 24,00^b$	$2,80 \pm 0,42^c$

Примечание. Сл — сливки, См — сметана, К — кефир.

Note. Cr — cream, Sm — sour cream, K — kefir.

У.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

го использования оставался более широким. Кефир характеризовался высокой начальной кислотностью и меньшей динамикой pH, но значительным ростом титруемой кислотности. Выявленная динамика согласуется с современными представлениями о кислотном гелеобразовании молочных систем. По мере снижения pH уменьшается устойчивость казеиновых мицелл, усиливается их агрегирование и формируется более плотная пространственная структура, что сопровождается ростом вязкости и плотности геля. Для модельных кислотных гелей и сливочно-сырных систем показано, что условия подкисления и состав матрицы существенно влияют на реологические свойства формирующейся структуры (Guzel-Seydim et al., 2000). В этом контексте высокая чувствительность сливок и смесей, содержащих сливки, к кислотонакоплению закономерно указывает на необходимость их более раннего направления на переработку по сравнению с более устойчивыми матрицами.

Для экстраполяции ускоренных испытаний на условия холодильного хранения была использована модель Аррениуса. Для линейного накопления дефектов степень деградации пропорциональна $k(T)$, поэтому:

$$t_5 = t_{32} \frac{k_{32}}{k_5} = 144 \text{ ч} \times 12,8 \approx 18,4 \times 10^2 \text{ ч (77 сут.).} \quad (5)$$

Таким образом, 144 ч хранения при 32 °C соответствовали приблизительно 77 сут. хранения при 5 °C. С учётом введённого коэффициента запаса 1,2 расчётный безопасный горизонт для промышленной интерпретации составляет около 64 сут.

Изменения жировой фазы и прогноз ее пригодности

Все исследованные продукты относились к высоковлажным системам ($a_w > 0,97$), что создавало условия для ускоренного развития гидролитических и окислительных изменений при нарушении холодильной цепи. В условиях ускоренного хранения перекисное число (PV) увеличивалось с 0,7–0,9 до 5,1–6,6 мэкв O_2 /кг, а кислотное число (AV) — с 0,6–0,8 до 1,7–2,2 мг KOH/г за 144 ч.

На основе полнофакторного эксперимента были получены регрессионные модели для прогнозирования PV и AV в зависимости от состава смеси и времени хранения. При этом x — массовая доля сметаны в смеси, y — массовая доля кефира, t — время хранения, ч, а массовая доля сливок задавалась как зависимый

параметр ($1 - x - y$). Для перекисного числа получено уравнение (6):

$$PV(x, y, t) = 0,71 + 0,052t + 0,34x - 0,008tx - 0,4x^2 + 0,18y - 0,006ty + 1,2xy \quad (6)$$

для кислотного числа — уравнение (7):

$$AV(x, y, t) = 0,54 + 0,012t - 0,2x + 0,4x^2 + 0,28y - 0,001ty + 0,4xy + 0,2y^2. \quad (7)$$

Высокие значения коэффициента детерминации ($R^2 = 0,898$ для PV и $0,905$ для AV) и низкие значения MAE подтвердили адекватность моделей в пределах изученного диапазона факторов. Поверхности отклика (Рисунок 1) показывают, что критический выход за пределы кормовой пригодности ($PV > 5$ мэкв O_2 /кг) наступал уже после 72 ч при 32 °C, тогда как по кислотному числу, нормируемому для технического животного жира первого сорта, все образцы сохраняли соответствие требованиям ГОСТ 1045–73 в течение всего исследуемого периода.

Профиль органических кислот как биомаркер направления утилизации

Анализ органических кислот (Таблица 2) показал интенсивное накопление молочной кислоты во всех исследованных смесях, особенно в комбинациях с кефиром. Содержание летучих жирных кислот (ЛЖК) более 1000 мг/л было характерно прежде всего для кефира и кефиросодержащих смесей.

Динамика жирнокислотного состава и кластеризация сырья

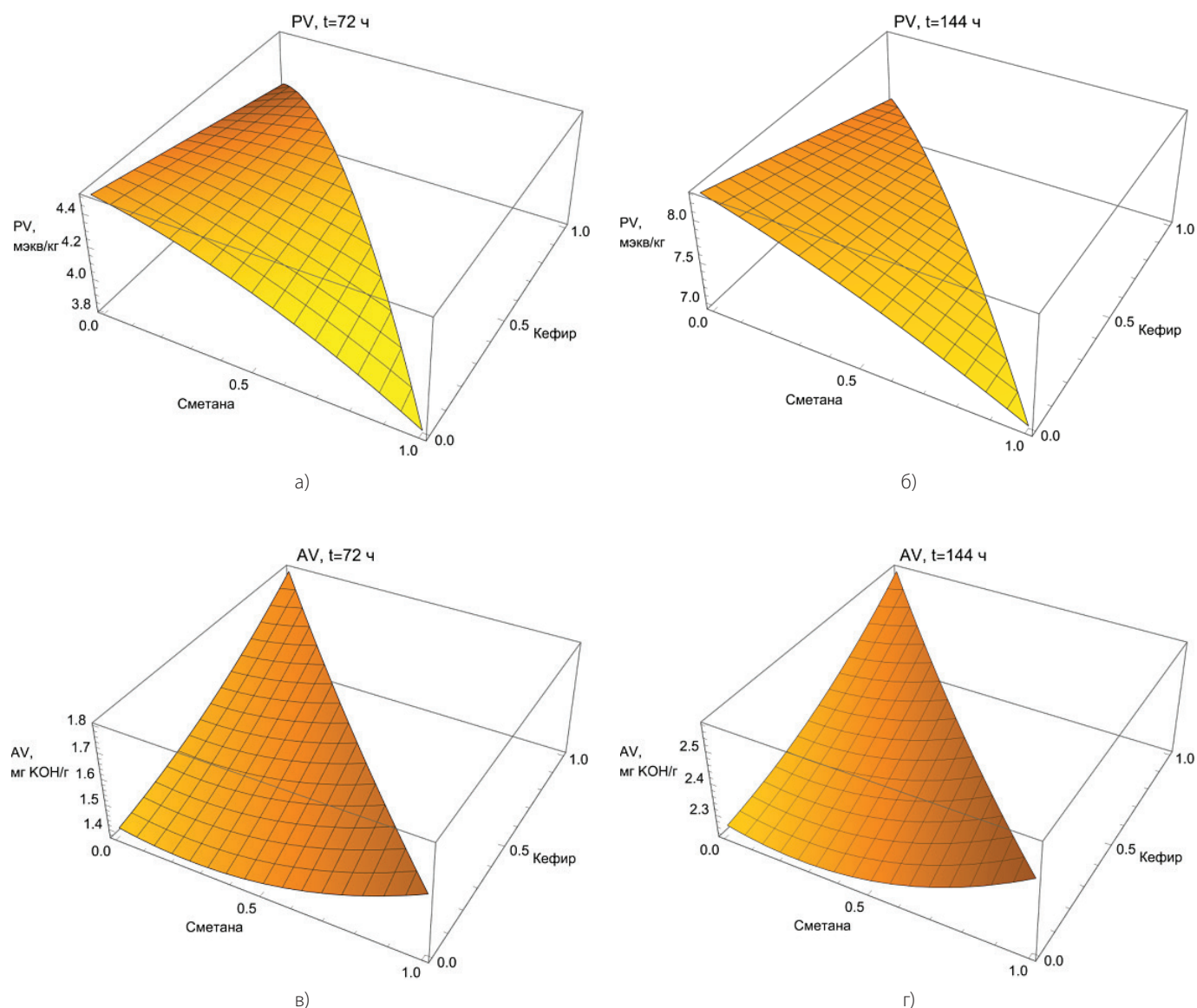
Изменения жирнокислотного состава (Рисунок 2) указывали на умеренную липолитическую активность в процессе хранения. В сметане и сметаносодержащих смесях содержание каприловой (C8:0) и каприновой (C10:0) кислот увеличивалось к 72 ч, после чего стабилизировалось. Во всех образцах к 144 ч было зафиксировано достоверное ($p < 0,05$) увеличение долей пальмитиновой (C16:0) и пальмитолеиновой (C16:1 cis-9) кислот приблизительно на 4 %, что свидетельствует о частичной деградации длинноцепочечных триглицеридов (Kong et al., 2019). Отношение C18:1 cis-9/C16:0 снижалось с $0,75 \pm 0,02$ до $0,69 \pm 0,02$, оставаясь в диапазоне, характерном для молочного жира. Одновременно

Рисунок 1

Поверхности отклика модели прогнозирования изменения перекисного числа (PV) и кислотного числа (AV) в зависимости от состава смеси и времени хранения

Figure 1

Response Surfaces of The Model for Predicting Changes in Peroxide Value (PV) And Acid Value (AV) Depending on The Mixture Composition and Storage Time



Примечание. (а) PV через 72 ч, (б) PV через 144 ч, (в) AV через 72 ч, (г) AV через 144 ч. Сметана и кефир указаны в долях, остаточная доля приходится на сливки.

Note. (A) PV At 72 H, (B) PV At 144 H, (C) AV At 72 H, (D) AV At 144 H. Sour Cream and Kefir Are Given in Fractions; The Remaining Fraction Corresponds to Cream

Таблица 2

Органические кислоты смесей молочных продуктов в процессе хранения

Table 2

Organic Acids of Dairy Product Mixtures During Storage

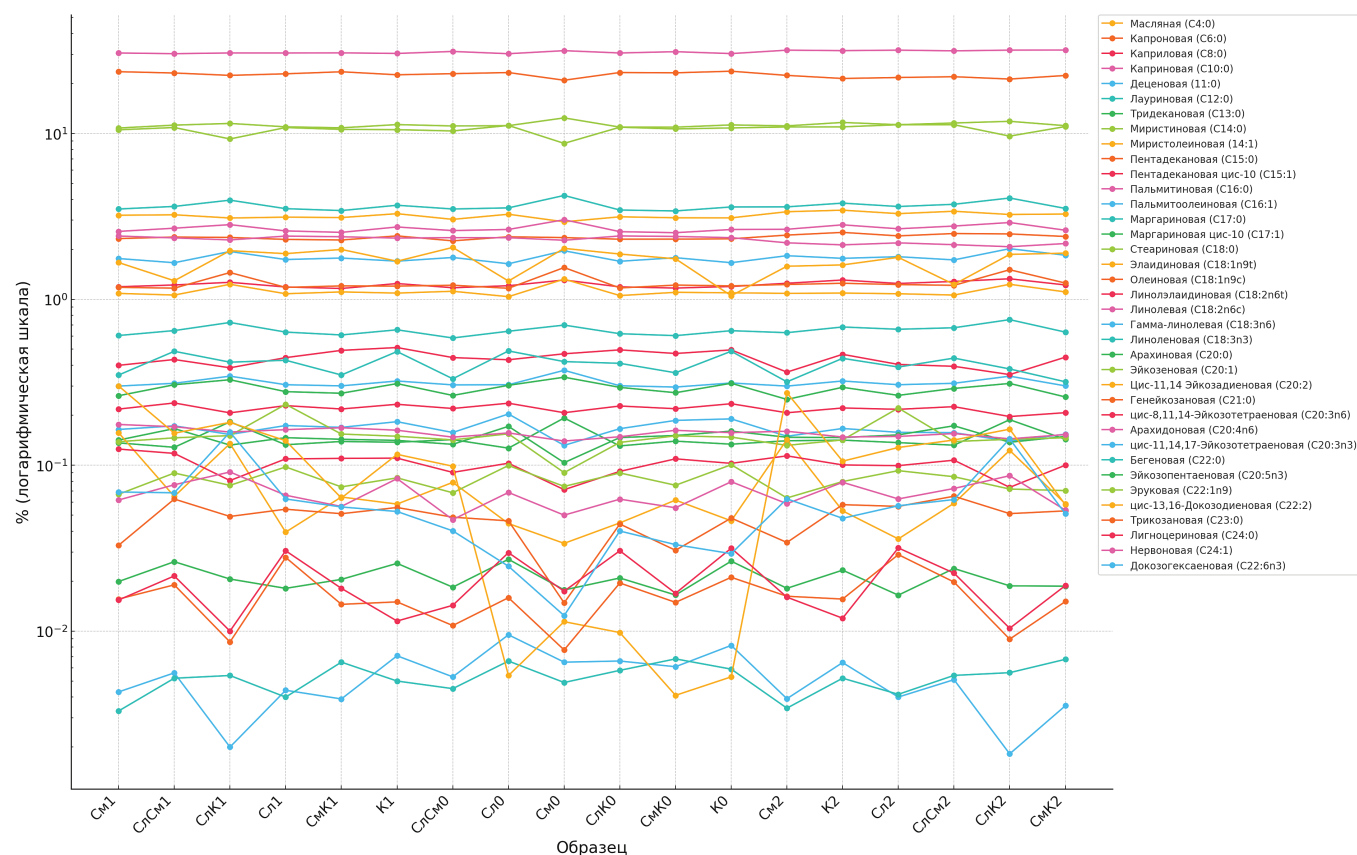
Кислота (мг/л)	Молочная		Лимонная		Муравьиная		Янтарная	Уксусная
	0 ч	72 ч	0 ч	72 ч	0 ч	72 ч	72 ч	72 ч
Сл	1913,3 ^a	5270 ^b	2561,7 ^a	1066,2 ^b	132,3 ^a	58,9 ^b	0	0
СлК	8347,7 ^a	13616 ^b	1537,0 ^a	1120,0 ^b	37,6 ^a	44,0 ^a	180	0
К	7448,9 ^a	14188 ^b	<1	<1	76,4 ^a	66,6 ^a	153	1007
СлСм	4738,2 ^a	5384 ^a	1701,5 ^a	1138,2 ^b	145,4 ^a	64,9 ^b	141	0
См	3640,5 ^a	4566 ^a	630,0	<1	34,9 ^a	42,6 ^a	484	0
СмК	6254,1 ^a	17550 ^b	829,4	<1	23,8 ^a	40,1 ^a	0	676

Рисунок 2

Динамика жирнокислотного состава образцов в хранении

Figure 2

Dynamics Of Fatty Acid Composition of Samples During Storage



Примечание. Обозначения: 0 — контроль, 1–72 ч хранения, 2–144 ч хранения.

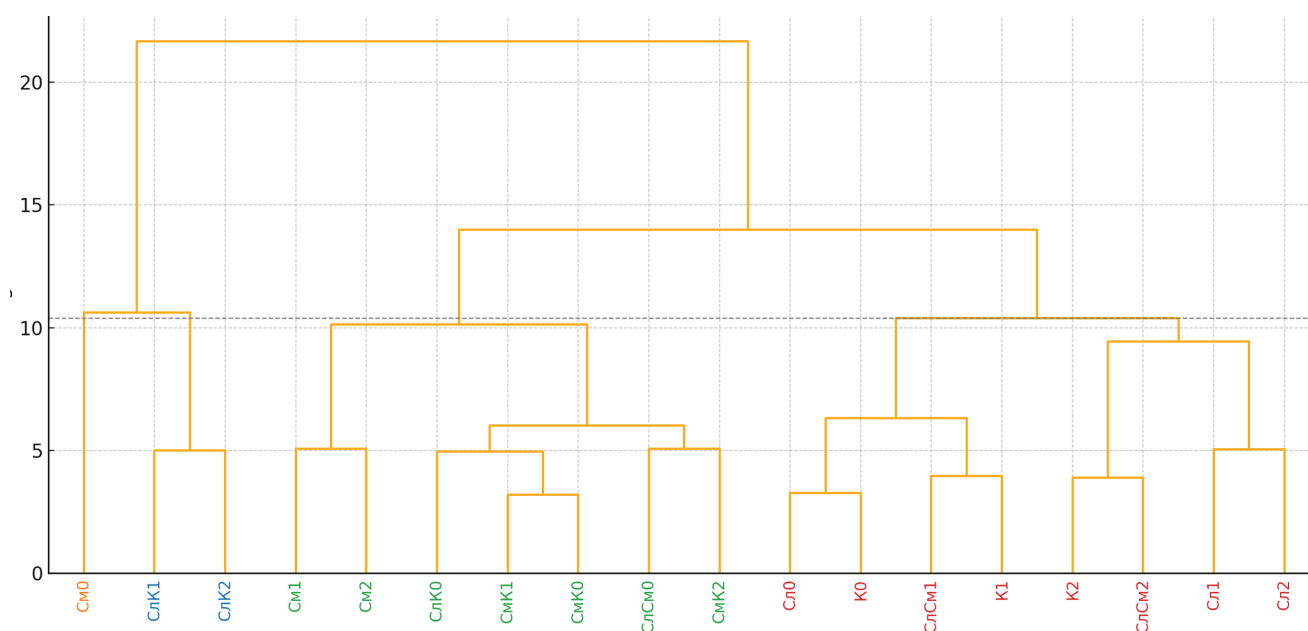
Note. Designations: 0 — Control, 1–72 H Of Storage, 2–144 H Of Storage.

Рисунок 3

Кластерный иерархический анализ деградационных изменений образцов смесей молочной продукции в процессе хранения

Figure 3

Cluster Hierarchical Analysis of Degradation Changes in Dairy Product Mixture Samples During Storage



наблюдалось увеличение доли насыщенных жирных кислот и снижение доли полиненасыщенных жирных кислот, что соответствует ранним стадиям окислительных изменений.

По результатам иерархического кластерного анализа Уорда (Рисунок 3) выделены четыре устойчивых кластера. Вклад исходной матрицы в объясненную дисперсию составил 35 %, времени хранения — 28 %. Для всех продуктов образцы 144 ч формировали отдельные подкластеры, оставаясь ближе к исходной матрице, чем к другим продуктам. Сметана и сметаносодержащие смеси формировали устойчивую отдельную ветвь, тогда как кефир оказался наиболее дистанцированным по жирнокислотному профилю.

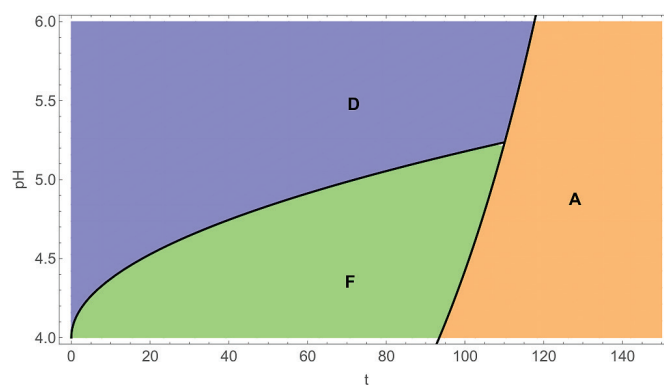
Результаты кластеризации были интегрированы в алгоритм сортировки, поскольку смешивание сырья внутри одного кластера обеспечивало более надежное прогнозирование деградационных изменений и более устойчивый выбор сценария переработки (Рисунок 4).

Рисунок 4

Фазовая диаграмма технологической целесообразности переработки смесей молочной продукции в зависимости от кислотности и времени хранения

Figure 4

Phase Diagram of the Technological Feasibility of Dairy Product Mixture Processing Depending on Acidity and Storage Time



Примечания. D — область целесообразности сушки, F — область отделения жировой фазы, A — область целесообразности анаэробного метаногенеза. «Тройная точка» технологической целесообразности: (109, 5.27).

Note. D — Region of Drying Feasibility, F — Region of Fat Phase Separation, A — Region of Anaerobic Methanogenesis Efficiency. "Triple Point" of Technological Feasibility: (109, 5.27).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью данного исследования являлось выявление критических параметров деградации смешанных молочных систем с предельным сроком годности и разработка на их основе алгоритмических принципов для интеллектуальной системы сортировки, обеспечивающей выбор оптимального направления переработки (жироотделение, сушка, анаэробное сбраживание). Дизайн эксперимента включал полнофакторное ускоренное хранение (32 °C, 144 ч) сливок, сметаны, кефира и их бинарных смесей, поэтому в обсуждении последовательно интерпретируются изменения кислотонакопления и реологических свойств, состояние жировой фазы, профиль органических кислот и жирнокислотный состав, а также рассматриваются ограничения полученных результатов.

Последовательность, в которой представлены результаты, отражает реальную цепочку принятия решений при маршрутизации молочного сырья с предельным сроком годности: от оценки скорости кислотонакопления — к пригодности жировой фазы, затем к профилю органических кислот как индикатору стадии ацидогенеза и, наконец, к унификации сырьевых потоков по жирнокислотному составу. Ключевым параметром, определяющим возможность механической переработки, выступает скорость кислотонакопления и сопутствующие реологические изменения. Резкое сгущение сливок (увеличение вязкости в 100 раз за 144 ч) отражает их высокую склонность к кислотной коагуляции и гелеобразованию, что существенно ограничивает технологическую перерабатываемость (Wang and Zhao, 2022; Wu et al., 2023; Yao et al., 2024). Добавление ферментированных компонентов (кефир, сметана) к сливкам ускоряет коагуляционные процессы и приводит к раннему гелеобразованию, потенциально повышая энергетические затраты при механической сепарации. Выявленная динамика согласуется с современными представлениями о кислотном гелеобразовании: по мере снижения pH уменьшается устойчивость казеиновых мицелл, усиливается их агрегирование и формируется более плотная пространственная структура (Wu et al., 2023). Высокая чувствительность сливок и сливоксодержащих смесей к кислотонакоплению указывает на необходимость их более раннего направления на переработку по сравнению со сметаной, которая демонстрирует более широкий допустимый интервал технологического использования. Модель Аррениуса здесь применяется

как инструмент сравнительной оценки направления и скорости изменений в соответствии с современной практикой исследований хранимоустойчивости молочной продукции (Andrewes, 2022).

Наряду с изменениями в белково-углеводной матрице, значимую информацию о пригодности сырья к переработке несет состояние жировой фазы. Эксперимент проводили в закрытой таре, что минимизировало фотоиндуцированное окисление. В таком случае наблюдаемые изменения перекисного числа (PV) и кислотного числа (AV) следует рассматривать преимущественно как результат внутренних гидролитических и окислительных процессов (Балабанова и др., 2014; Arise et al., 2022). Совместный рост обоих показателей указывает на одновременное развитие окислительных и гидролитических изменений — аналогично тому, что описано для сливочного масла (Krause et al., 2008) и ультрапастеризованного молока (Lu et al., 2019), где повышение температуры и продолжительности хранения сопровождается усилением липолиза, окисления и уменьшением доли ненасыщенных жирных кислот. В этом контексте предварительное жироотделение из более деградированных систем можно рассматривать как технологически обоснованный этап: он позволяет выделить липидную фракцию до достижения уровней порчи, ограничивающих дальнейшие варианты ее использования.

Особого внимания заслуживает профиль органических кислот, который позволяет дифференцировать сырье для разных биотехнологических маршрутов. Высокая концентрация молочной кислоты при наличии остаточной лактозы делает большинство систем потенциально пригодным субстратом для получения технической молочной кислоты. Накопление молочной кислоты в кефирных и кефирсодержащих системах согласуется с данными по постацидификации кефира при хранении: установлено, что ее содержание продолжает расти даже при незначительной динамике pH (Guzel-Seydim et al., 2000). Вместе с тем в условиях спонтанного брожения вероятно формирование рацемической (DL) смеси, менее ценной технологически по сравнению с оптически чистым L-лактатом (Волкова, 2002; Cai et al., 2010; Kong et al., 2019), что ограничивает привлекательность этого маршрута без дополнительной стабилизации процесса. Порог летучих жирных кислот (ЛЖК) > 1000 мг/л предложен как дополнительный критерий для перенаправления субстрата после жироотделения на анаэробное

сбраживание (Михеева и др., 2020; Панов и др., 2013; Kuczman et al., 2018; Mao et al., 2015). Для молочных стоков и сыворотки высокая биodeградируемость, кислая среда и низкая щелочность создают риск закисления анаэробного процесса, особенно при повышенной нагрузке (Hassan and Nelson, 2012; Prazeres et al., 2012), а накопление ЛЖК отражает нарушение равновесия между ацидогенезом и метаногенезом (Casallas-Ojeda et al., 2024; Hassan and Nelson, 2012). Этот порог следует рассматривать как практический критерий для исследованных молочных систем, а не как универсальную величину для всех видов анаэробной переработки.

Завершающим звеном в интерпретации деградационных изменений выступает жирнокислотный профиль, который, помимо самостоятельного значения, позволяет унифицировать сырьевые потоки. Наблюдаемый сдвиг жирнокислотного состава — рост доли насыщенных кислот и снижение доли полиненасыщенных — соответствует ранним стадиям окислительных изменений и согласуется с закономерностью, согласно которой ненасыщенные компоненты вовлекаются в окислительные процессы в первую очередь (Lu et al., 2019). Принципиально важно, что кластерный анализ выявил устойчивое доминирование фактора исходной матрицы над фактором времени хранения (35 % против 28 % объясненной дисперсии): это означает, что состав сырья сильнее определяет траекторию деградации, чем длительность хранения как таковая. Обособленное положение кефира в дендрограмме указывает на необходимость для него отдельного сценария технологического рециклинга; смешивание сырья внутри одного кластера обеспечивает более надежное прогнозирование деградационных изменений и более устойчивый выбор маршрута переработки.

Ограничения исследования

Настоящее исследование было ограничено анализом деградационных изменений в пределах трёх видов молочной продукции (сливки, сметана, кефир) и их бинарных смесей в условиях модельного ускоренного хранения при фиксированной температуре. Полученные данные могут не полностью отражать вариабельность состава и кинетику порчи реальных смешанных молочных отходов, образующихся в логистических цепях с колебаниями температур. Кроме того, предложенный пороговый критерий летучих жирных кислот (>1000 мг/л) обоснован только для изученных систем, а отсутствие разделе-

ния оптических изомеров молочной кислоты ограничивает оценку маршрута кислотной валоризации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило, что молочная продукция с предельным сроком годности представляет собой неоднородное сырье, в котором направленность дальнейшей переработки определяется не формальным сроком хранения, а совокупностью деградационных изменений, формирующихся в конкретной молочной системе. В наибольшей степени технологическое поведение таких систем связано с изменением физико-химических и реологических показателей, состоянием жировой фазы и профилем органических кислот. В этой связи предложенный подход позволяет рассматривать выявленные показатели не только как характеристики порчи, но и как критические биомаркеры, пригодные для интеллектуальной сортировки сырья и выбора рационального направления переработки. Такое представление переводит оценку молочной продукции с предельным сроком годности из описательной плоскости в технологическую, где степень деградации соотносится с возможностью жиροотделения, дальнейшей ферментации, анаэробного сбраживания или других вариантов валоризации.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные положения могут быть использованы при организации предварительной оценки, сортировки и маршрутизации молочной продукции, выведенной из стандартного оборота, на этапах хранения, логистики и переработки. Их применение создает предпосылки для более полного использования ресурсного потенциала молочного сырья, снижения потерь ценных компонентов и повышения обоснованности технологических решений.

Дальнейшее развитие данного направления целесообразно связывать с расширением круга исследуемых молочных систем, проверкой установленных закономерностей в производственных условиях и совершенствованием прогностических моделей, учитывающих специфику состава сырья, глубину деградационных изменений и условия последующей переработки. Перспективным представляется и развитие алгоритмов интеллектуальной сортировки как основы для комплексных систем валоризации молочной продукции с предельным сроком годности.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Дмитрий Сергеевич Рыскин: концептуализация; методология; проведение исследования; подготовка рукописи.

Владислав Константинович Семипятный: эмпирические исследования; верификация данных.

Елена Евгеньевна Илларионова: проведение исследования; эмпирические исследования; валидация результатов.

Дарья Владимировна Климова: проведение исследования; эмпирические исследования; верификация данных; написание рукописи.

Анастасия Валерьевна Косарева: валидация результатов; визуализация данных; верификация данных.

Константин Эдуардович Ануфриев: эмпирические исследования; верификация данных.

Анастасия Евгеньевна Рябова: валидация результатов; верификация данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Dmitry S. Ryskin: conceptualization; methodology; investigation; manuscript preparation.

Vladislav K. Semipyatnyi: empirical research; data verification.

Elena E. Illarionova: investigation; empirical research; validation of results.

Daria V. Klimova: investigation; empirical research; data verification; manuscript writing.

Anastasia V. Kosareva: validation of results; data visualization; data verification.

Konstantin E. Anufriev: empirical research; data verification.

Anastasia E. Ryabova: validation of results; data verification.

ЛИТЕРАТУРА

- Бабаев, В. Н., Горох, Н. П., & Коринько, И. В. (2011). Энергетический потенциал метанообразования при мезофильном анаэробном разложении органической составляющей отходов. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, 4(6), 59–65.
- Балабанова М. Ю., Складнев Е. В., Панов С. Ю. (2014). Математическое моделирование процесса химико-термической переработки целлюлозосодержащих отходов. *Химическая промышленность*, 91(1), 11–14.
- Волкова Г. С. (2002). *Исследование процессов ферментации отходов переработки сельскохозяйственного сырья с помощью кислотообразующих бактерий для получения молочной кислоты и ее производных* [Дис. канд. техн. наук]. Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии РАСХН.
- Михеева Э. Р., Катраева И. В., Ворожцов Д. Л., Литти Ю. В., & Ножевникова А. Н. (2020). Эффективность двухфазного анаэробного сбраживания и физико-химические свойства органической фракции твердых коммунальных отходов, предобработанных в аппарате вихревого слоя. *Прикладная биохимия и микробиология*, 56(6), 619–626. <https://doi.org/10.31857/S0555109920060112>.
- Панов С. Ю., Чернецкая А. А., Жучков А. В., & Рязанов А. В. (2013). Разработка научных основ технологии утилизации пищевых отходов методом анаэробного сбраживания. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 4(58), 200–204.
- Цавкелова, Е. А., Егорова М. А., Петрова Е. В., & Нетрусов А. И. (2012). Образование биогаза микробными сообществами при разложении целлюлозы и пищевых отходов. *Прикладная биохимия и микробиология*, 48(4), 417. <https://doi.org/10.1134/S0003683812040126>
- Al-Jumaily A. M., Meshkinzar A., Torres L. M. P. (2023). On the development of emulsion destabilization technologies for dairy industry. *Food Engineering Reviews*, 15(2), 215–229. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09336-4>
- Andrewes P. (2022). Predicting the shelf-life of microbially-stabilised dairy products: What are the roles of stability studies, storage trials, accelerated trials, and dairy science? *International Dairy Journal*, 125, 105239. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105239>
- Antonelli J., Lindino C. A., Azevedo J. C. R. de, Souza S. N. M. de, Cremonez P. A., & Rossi E. (2016). Biogas production by the anaerobic digestion of whey. *Revista de Ciências Agrárias*, 39(3), 463–467. <https://doi.org/10.19084/RCA15087>

- Arise A. K., Malomo S. A., Cynthia C. I., Aliyu N. A., & Arise R. O. (2022). Influence of processing methods on the antinutrients, morphology and in-vitro protein digestibility of jack bean. *Food Chemistry Advances*, 1, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100078>
- Cai Y., Liang X., Liao X., Ding Y., Sun J., & Li X. (2010). High-yield hypocrellin A production in solid-state fermentation by *Shiraia* sp. SUPER-H168. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 160(8), 2275–2286. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8728-3>
- Casallas-Ojeda M. et al., Perez-Esteban N., Cabeza I., Cobo M., Olaya-Rincon M., Caicedo-Concha D. M., & Astals S. (2024). Understanding the acidification risk of cheese whey anaerobic digestion under psychrophilic and mesophilic conditions. *Heliyon*, 10(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26476>
- Ergüder T. H., Tezel U., Güven E., & Demirer G. N. (2001). Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors. *Waste Management*, 21(7), 643–650. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00114-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00114-8)
- Guzel-Seydim Z., Seydim A. C., Greene A. K. (2000). Organic acids and volatile flavor components evolved during refrigerated storage of kefir. *Journal of Dairy Science*, 83(2), 275–277. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74874-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74874-0)
- Guzel-Seydim Z., Seydim A. C., & Greene A. K. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. FAO.
- Hassan A. N., Nelson B. K. (2012). Invited review: Anaerobic fermentation of dairy food wastewater. *Journal of Dairy Science*, 95(11), 6188–6203. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5732>
- Kalibekkyzy Z., Zhakupbekova S., Rebezov M., Nurgazezova A., Nurymkhan G., Kassymov S., Baytukenova S., Mateyeva A., Maizhanova A., & Kapshakbayeva Z. (2026). Valorization of dairy and plant by-products as functional ingredients in Kurt (Dried fermented milk product): Effects on nutritional, physicochemical, and sensory properties. *Foods*, 15(2), 369. <https://doi.org/10.3390/foods15020369>
- Kong X., Zhang B., Hua Y., Zhu Y., Li W., Wang D., & Hong J. (2019). Efficient L-lactic acid production from corncob residue using metabolically engineered thermo-tolerant yeast. *Bioresource Technology*, 273, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.018>
- Krause A. J., Miracle R. E., Sanders T. H., Dean L. L., & Drake M. A. (2008). The effect of refrigerated and frozen storage on butter flavor and texture. *Journal of Dairy Science*, 91(2), 455–465. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0717>
- Kuczman O., Gueri M. V. D., De Souza S. N. M., Schirmer W. N., Alves H. J., Secco D., Buratto W. G., Ribeiro C. B., & Hernandez F. B. (2018). Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 196, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.282>
- Lu J., Langton M., Sampels S., & Pickova J. (2019). Lipolysis and oxidation in ultra-high temperature milk depend on sampling month, storage duration, and temperature. *Journal of Food Science*, 84(5), 1045–1053. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14514>
- Mao C., Feng Y., Wang X., & Ren G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Narisetty V., Adlakha N., Singh N. K. (2022). Integrated biorefineries for repurposing of food wastes into value-added products. *Bioresource Technology*, 363(127856). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127856>
- Nayik J.K., Ranade V. V. (2025). Valorisation of digestate: Characteristics, products, processes and potential. *Chemical Engineering Journal Advances*, (100887). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100887>
- Prazeres J. R., Carvalho F., Rivas J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>
- Saini R. K., Prasad P., Shang X., & Keum Y. S. (2021). Advances in lipid extraction methods — A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(24), 13643. <https://doi.org/10.3390/ijms222413643>
- Udourioh G. A., Solomon M. M., Okolie J. (2025). A review of the valorization of dairy industry wastes through thermochemical, biological, and integrated processes for value-added products. *Food Science of Animal Resources*, 45(2), 375–408. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2025.e2>
- Wang X., Zhao Z. (2022). Acid-induced gelation of milk: Formation mechanism, gel characterization, and influence of different techniques. *Current Issues and Advances in the Dairy Industry*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107893>

У.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

- Wu Q, Ong L, Yao S, Kentish S. E., & Gras S. L. (2023). Effect of ultrafiltered milk on the rheological and microstructure properties of cream cheese acid gels. *Food and Bioprocess Technology*, 16(8), 1728–1745. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02991-1>
- Yao D., Sun L. C., Zhang L. J., Chen Y. L., Miao S., Cao M. J., & Lin D. (2024). Emulsion structural remodeling in milk and its gelling products: A review. *Gels*, 10(10), 671. <https://doi.org/10.3390/gels10100671>

REFERENCES

- Al-Jumaily A. M., Meshkinzar A., Torres L. M. P. (2023). On the development of emulsion destabilization technologies for dairy industry. *Food Engineering Reviews*, 15(2), 215–229. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09336-4>
- Andrewes P. (2022). Predicting the shelf-life of microbially-stabilised dairy products: What are the roles of stability studies, storage trials, accelerated trials, and dairy science? *International Dairy Journal*, 125, 105239. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105239>
- Antonelli J., Lindino C. A., Azevedo J. C. R. de, Souza S. N. M. de, Cremonez P. A., & Rossi E. (2016). Biogas production by the anaerobic digestion of whey. *Revista de Ciências Agrárias*, 39(3), 463–467. <https://doi.org/10.19084/RCA15087>
- Arise A. K., Malomo S. A., Cynthia C. I., Aliyu N. A., & Arise R. O. (2022). Influence of processing methods on the antinutrients, morphology and in-vitro protein digestibility of jack bean. *Food Chemistry Advances*, 1, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100078>
- Babaev, V. N., Gorokh, N. P., & Korinko, I. V. (2011). Energy potential of methane formation during mesophilic anaerobic decomposition of organic waste component. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(6(52)), 59–65. (In Russ.).
- Balabanova, M. Yu., Sklyadnev, E. V., & Panov, S. Yu. (2014). Mathematical modeling of chemical-thermal processing of cellulose-containing waste. *Chemical Industry*, 91(1), 11–14. (In Russ.).
- Cai Y., Liang X., Liao X., Ding Y., Sun J., & Li X. (2010). High-yield hypocrellin A production in solid-state fermentation by *Shiraia* sp. SUPER-H168. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 160(8), 2275–2286. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8728-3>
- Casallas-Ojeda M. et al., Perez-Esteban N., Cabeza I., Coboa M., Olaya-Rincon M., Caicedo-Concha D. M., & Astals S. (2024). Understanding the acidification risk of cheese whey anaerobic digestion under psychrophilic and mesophilic conditions. *Heliyon*, 10(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26476>
- Ergüder T. H., Tezel U., Güven E., & Demirel G. N. (2001). Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors. *Waste Management*, 21(7), 643–650. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00114-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00114-8)
- Guzel-Seydim Z., Seydim A. C., Greene A. K. (2000). Organic acids and volatile flavor components evolved during refrigerated storage of kefir. *Journal of Dairy Science*, 83(2), 275–277. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74874-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74874-0)
- Guzel-Seydim Z., Seydim A. C., & Greene A. K. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. FAO.
- Hassan A. N., Nelson B. K. (2012). Invited review: Anaerobic fermentation of dairy food wastewater. *Journal of Dairy Science*, 95(11), 6188–6203. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5732>
- Kalibekkyzy Z., Zhakupbekova S., Rebezov M., Nurgazezova A., Nurymkhan G., Kassymov S., Baytukenova S., Mateyeva A., Maizhanova A., & Kapshakbayeva Z. (2026). Valorization of dairy and plant by-products as functional ingredients in Kurt (Dried fermented milk product): Effects on nutritional, physicochemical, and sensory properties. *Foods*, 15(2), 369. <https://doi.org/10.3390/foods15020369>
- Kong X., Zhang B., Hua Y., Zhu Y., Li W., Wang D., & Hong J. (2019). Efficient L-lactic acid production from corncob residue using metabolically engineered thermo-tolerant yeast. *Bioresource Technology*, 273, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.018>
- Krause A. J., Miracle R. E., Sanders T. H., Dean L. L., & Drake M. A. (2008). The effect of refrigerated and frozen storage on butter flavor and texture. *Journal of Dairy Science*, 91(2), 455–465. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0717>
- Kuczman O., Guerri M. V. D., De Souza S. N. M., Schirmer W. N., Alves H. J., Secco D., Buratto W. G., Ribeiro C. B., & Hernandez F. B. (2018). Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 196, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.282>

У.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

- Lu J., Langton M., Sampels S., & Pickova J. (2019). Lipolysis and oxidation in ultra-high temperature milk depend on sampling month, storage duration, and temperature. *Journal of Food Science*, 84(5), 1045–1053. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14514>
- Mao C., Feng Y., Wang X., & Ren G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Mikheeva, E. R., Katraeva, I. V., Vorozhtsov, D. L., Litti, Yu. V., & Nozhevnikova, A. N. (2020). Efficiency of two-phase anaerobic digestion and physicochemical properties of the organic fraction of municipal solid waste pretreated in a vortex layer apparatus. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 56(6), 619–626. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0555109920060112>
- Narisetty V., Adlakha N., Singh N. K. (2022). Integrated biorefineries for repurposing of food wastes into value-added products. *Bioresource Technology*, 363(127856). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127856>
- Nayik J.K., Ranade V. V. (2025). Valorisation of digestate: Characteristics, products, processes and potential. *Chemical Engineering Journal Advances*, (100887). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100887>
- Panov, S. Yu., Chernetskaya, A. A., Zhuchkov, A. V., & Ryazanov, A. V. (2013). Development of scientific foundations of food waste utilization technology by anaerobic digestion. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*, 4(58), 200–204. (In Russ.).
- Prazeres J. R., Carvalho F., Rivas J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>
- Saini R. K., Prasad P., Shang X., & Keum Y. S. (2021). Advances in lipid extraction methods — A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(24), 13643. <https://doi.org/10.3390/ijms222413643>
- Tsavelkova, E. A., Egorova, M. A., Petrova, E. V., & Netrusov, A. I. (2012). Biogas production by microbial communities during decomposition of cellulose and food waste. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 48(4), 417. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0003683812040126>
- Udourioh G. A., Solomon M. M., Okolie J., et al. (2025). A review of the valorization of dairy industry wastes through thermochemical, biological, and integrated processes for value-added products. *Food Science of Animal Resources*, 45(2), 375–408. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2025.e2>
- Volkova, G. S. (2002). Study of fermentation processes of agricultural waste using acid-forming bacteria for producing lactic acid and its derivatives [Unpublished candidate dissertation]. All-Russian Research Institute of Food Biotechnology, Russian Academy of Agricultural Sciences. (In Russ.).
- Wang X., Zhao Z. (2022). Acid-induced gelation of milk: Formation mechanism, gel characterization, and influence of different techniques. *Current Issues and Advances in the Dairy Industry*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107893>
- Wu Q., Ong L., Yao S., Kentish S. E., & Gras S. L. (2023). Effect of ultrafiltered milk on the rheological and microstructure properties of cream cheese acid gels. *Food and Bioprocess Technology*, 16(8), 1728–1745. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02991-1>
- Yao D., Sun L. C., Zhang L. J., Chen Y. L., Miao S., Cao M. J., & Lin D. (2024). Emulsion structural remodeling in milk and its gelling products: A review. *Gels*, 10(10), 671. <https://doi.org/10.3390/gels10100671>

ОБ АВТОРАХ

Рыскин Дмитрий Сергеевич, аспирант лаборатории пищевой метаинженерии, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9567-7414>, ryskin.dmitry@gmail.com

Семипятный Владислав Константинович, доктор технических наук, заведующий лабораторией пищевой метаинженерии, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1241-0026>, Researcher ID: M-1915-2017, Scopus ID: 56497188700, SPIN-код: 4246-3862, e-mail: v_semipyatnyi@vnimi.org

У.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

Илларионова Елена Евгеньевна, научный сотрудник лаборатории технологий молочных продуктов, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9390-0984>, Researcher ID: G-7862-2019, Scopus ID: 57208421852, SPIN-код: 2990-2390, e-mail: e_illarionova@vnimi.org

Климова Дарья Владимировна, инженер-исследователь лаборатории пищевой метаинженерии, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1628-7681>, SPIN-код: 7842-0885, e-mail: d_klimova@vnimi.org

Косарева Анастасия Валерьевна, инженер-исследователь лаборатории пищевой метаинженерии, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0551-8058>, SPIN-код: 7431-9795, e-mail: a_kosareva@vnimi.org

Ануфриев Константин Эдуардович, младший научный сотрудник лаборатории пищевой метаинженерии, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6632-8004>, SPIN-код: 2159-2015, e-mail: k_anufriev@vnimi.org

Рябова Анастасия Евгеньевна, доктор технических наук, заместитель директора по образованию, старший научный сотрудник лаборатории технологий биотрансформации и консервирования ФГАНУ «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>, ResearcherID: R-8359-2018, Scopus ID: 56496797800, SPIN-код: 8425-8422, e-mail: a_ryabova@vnimi.org

ABOUT THE AUTHORS

Ryskin Dmitry Sergeevich, Postgraduate Student, Laboratory of Food Systems Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya street, 35), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9567-7414>, e-mail: ryskin.dmitry@gmail.com

Semipyatniy Vladislav Konstantinovich, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Food Systems Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, ul. Lyusinovskaya, 35, korp. 7). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1241-0026>, Researcher ID: M-1915-2017, Scopus ID: 56497188700, SPIN-код: 4246-3862, e-mail: v_semipyatniy@vnimi.org

Illarionova Elena Evgenyevna, Researcher, Laboratory of Dairy Product Technology, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, ul. Lyusinovskaya, 35, korp. 7). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9390-0984>, Researcher ID: G-7862-2019, Scopus ID: 57208421852, SPIN-код: 2990-2390, e-mail: e_illarionova@vnimi.org

Klimova Daria Vladimirovna, Research Engineer, Laboratory of Food Systems Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, ul. Lyusinovskaya, 35, korp. 7). ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1628-7681>, SPIN-код: 7842-0885, e-mail: d_klimova@vnimi.org

Kosareva Anastasia Valeryevna, Research Engineer, Laboratory of Food Systems Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, ul. Lyusinovskaya, 35, korp. 7). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0551-8058>, SPIN-код: 7431-9795, e-mail: a_kosareva@vnimi.org

Anufriev Konstantin Eduardovich, Junior Researcher, Laboratory of Food Systems Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, ul. Lyusinovskaya, 35, korp. 7). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6632-8004>, SPIN-код: 2159-2015, e-mail: k_anufriev@vnimi.org

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

Разработка рецептур инстантных смузи на основе ферментализованного тыквенного пюре и продуктов переработки дикоросов

Е.Д. Рожнов, М.Н. Школьников, О.Н. Мусина

Алтайский государственный
технический университет
им. И. И. Ползунова, г. Барнаул,
Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Несмотря на интерес потребителей к функциональным смузи, большинство рецептур этого напитка ориентированы на свежие или замороженные компоненты, что ограничивает логистику и срок годности. Применение сухих инстантных форм на основе ферментализованного тыквенного пюре для повышения биодоступности β -каротина изучено недостаточно. Отсутствуют системные данные о синергетическом сочетании ферментализованной тыквы с продуктами глубокой переработки дикоросов (облепихи и брусники) в формате быстрорастворимых напитков. Данное исследование восполняет этот пробел, обосновывая рецептуру инстантных смузи, объединяющих нутрициологическую ценность, ресурсосберегающий подход и целевые органолептические характеристики.

Цель: Разработка рецептур инстантных напитков типа смузи на основе сухого ФТП, обогащённого экстрактами и шротами облепихи и брусники, с достижением высоких органолептических характеристик, обеспечением целевого содержания β -каротина, а также оценкой функционально-технологического и синергетического эффекта комбинаций растительных полуфабрикатов.

Материалы и методы: Объектами исследования являлись: сухое ФТП; сухие экстракты облепихи и брусники и порошки из шротов облепихи и брусники. Изучали физико-химические показатели (влажность, полифенолы, β -каротин, кислотность) и функционально-технологические свойства (водоудерживающая способность, жиродерживающая способность, смачиваемость, насыпная плотность). Органолептический анализ проводили профильным методом ($n = 10$) по 5-балльной шкале с весовыми коэффициентами. Статистическую обработку выполняли с использованием ANOVA, критерия Тьюки, U-критерия Манна-Уитни, корреляционного анализа Спирмена ($p < 0,05$).

Результаты: Обоснована рациональная концентрация ФТП в готовом напитке – 12 % (60 г на 100 г сухой смеси), обеспечивающая густую консистенцию и содержание β -каротина 1,32 мг на порцию (26,4 % от суточной нормы). Разработано 6 вариантов рецептур. Наивысший комплексный органолептический балл (4,88) получен для образца с комбинацией экстрактов облепихи и брусники. Содержание β -каротина в образцах варьировало от 0,53 до 1,03 мг/100 г, что обеспечивает 26,6–51,6 % суточной нормы в порции. Выявлена сильная положительная корреляция между содержанием полифенолов и органолептической оценкой ($r = 0,81$; $p < 0,05$).

Выводы: Разработана рецептура инстантного смузи (основа — ФТП, экстракт облепихи, экстракт брусники) с высокими органолептическими свойствами и пищевой ценностью. Показана целесообразность использования экстрактов дикоросов и вторичных продуктов их переработки (шротов) для создания функциональных напитков. Продукт рекомендован для коррекции нутритивного статуса населения, в том числе проживающего в экстремальных климатических условиях.

Ключевые слова: инстантные напитки; ферментализованное тыквенное пюре; сухой экстракт облепихи и брусники; шрот ягод; каротиноиды; полифенолы

Корреспонденция:

Ольга Николаевна Мусина

E-mail: musinaon@altgtu.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 01.02.2026

Принята: 15.06.2026

Опубликована: 30.06.2026

Финансирование:

Работа выполнена в рамках
госзадания Минобрнауки РФ
(№ 075-03-2024-105, номер темы
FZMM-2024-0003, рег. № НИОКТР
124013000666-5).

Copyright: © 2026 Авторы



Для цитирования: Рожнов, Е.Д., Школьников, М.Н., & Мусина, О.Н. (2026). Разработка рецептур инстантных смузи на основе ферментализованного тыквенного пюре и продуктов переработки дикоросов. *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 25–41. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.109>

Development of Instant Smoothie Formulations Based on Enzyme-Hydrolyzed Pumpkin Purée and Processed Wild-Growing Berries

Evgeny D. Rozhnov, Marina N. Shkolnikova, Olga N. Musina

Polzunov Altai State Technical
University, Barnaul, Russian
Federation

ABSTRACT

Background: Despite growing consumer interest in functional smoothies, most existing formulations rely on fresh or frozen ingredients, which limits logistics and shelf life. The use of dry instant formats based on enzyme-hydrolyzed pumpkin purée to enhance β -carotene bioavailability remains underexplored. Furthermore, systematic data on the synergistic combination of enzyme-hydrolyzed pumpkin with processed products of Siberian wild berries (sea buckthorn and lingonberry) in instant beverages are currently lacking. This study addresses this gap by scientifically substantiating the formulation of instant smoothies that integrate nutritional value, a resource-efficient approach, and targeted sensory characteristics.

Purpose: To develop formulations for instant smoothie-type beverages based on dried enzyme-hydrolyzed pumpkin purée (EHP), enriched with extracts and pomace of sea buckthorn and lingonberry, aiming to achieve high sensory quality, ensure target levels of β -carotene, and evaluate the techno-functional and synergistic effects of plant-based ingredient combinations.

Materials and Methods: The research objects included: dried EHP; dried sea buckthorn and lingonberry extracts; and powders obtained from sea buckthorn and lingonberry pomace. Physicochemical parameters (moisture content, polyphenols, β -carotene, acidity) and functional-technological properties (water-holding capacity, fat-holding capacity, wettability, bulk density) were determined. Sensory analysis was performed using the profile method ($n = 10$) on a 5-point scale with weighting coefficients. Statistical processing was carried out using ANOVA, Tukey's test, Mann–Whitney U test, and Spearman's rank correlation analysis ($p < 0.05$).

Results: The optimal concentration of EHP in the ready-to-drink beverage was substantiated at 12 % (60 g per 100 g of dry mix), providing a thick consistency and β -carotene content of 1.32 mg per serving (26.4 % of the daily requirement). Six formulation variants were developed. The highest comprehensive sensory score (4.88) was obtained for the sample combining sea buckthorn and lingonberry extracts. The β -carotene content in the samples ranged from 0.53 to 1.03 mg/100 g, providing 26.6–51.6 % of the daily requirement per serving. A strong positive correlation was identified between polyphenol content and sensory evaluation ($\rho = 0.81$; $p < 0.05$).

Conclusion: The formulation of an instant smoothie (based on EHP, sea buckthorn extract, and lingonberry extract) with high sensory properties and nutritional value has been substantiated. The feasibility of utilizing both wild berry extracts and their secondary processing products (pomace) for creating functional beverages has been demonstrated. The product is recommended for optimizing the nutritional status of the population, including those residing in extreme climatic conditions.

Keywords: instant beverages; enzyme-hydrolyzed pumpkin purée; dried sea buckthorn; lingonberry extract; berry pomace; carotenoids; polyphenols

Correspondence:

Olga N. Musina

E-mail: musinaon@altgtu.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 01.02.2026

Accepted: 15.06.2026

Published: 30.06.2026

Funding:

The research was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-03-2024-105, 124013000666-5).

Copyright: © 2026 The Authors



To cite: Rozhnov, E.D., Shkolnikova, M.N., & Musina, O.N. (2026). Development of instant smoothie formulations based on enzyme-hydrolyzed pumpkin purée and processed wild-growing berries. *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 25–41. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.109>

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение населения полноценными пищевыми продуктами, обладающими не только высокой питательной ценностью, но и направленными физиологическими эффектами, является одной из важных задач современной нутрициологии. Эта задача приобретает особую значимость в регионах с экстремальными климатическими условиями, таких как Арктическая зона Российской Федерации, где наблюдается устойчивый дефицит свежих растительных продуктов, богатых витаминами и биологически активными соединениями (Новикова и др., 2023), что также подтверждается данными выборочного наблюдения состояния здоровья населения регионов России, регулярно проводимого Росстатом¹. Каротиноиды могут служить объективными маркерами потребления овощей и фруктов, поскольку организм не может их синтезировать, и они поступают только с растительной пищей. Исследования показывают, что рацион россиян характеризуется дефицитом витаминов и антиоксидантов, в частности недостаточное потребление β -каротинов отмечено 38% опрошенных (Gorbachev et al., 2023). Обзор по северным территориям России отмечает дефицит витамина А и β -каротина у значительной части как коренного, так и «пришлого» населения; для β -каротина у взрослых северян сообщается о дефиците у 78% обследованных (Nikogosyan et al., 2025).

Недостаточное потребление каротиноидов и полифенолов негативно сказывается на нутритивном статусе и адаптационных возможностях организма. В этих условиях перспективным направлением является создание сухих концентратов быстрого приготовления, сочетающих логистические преимущества (низкая масса, компактность, устойчивость к микробной порче при надлежащей упаковке, длительный срок хранения) с высокой биологической ценностью (Dhiman et al., 2017; Wang et al., 2010).

В данном контексте перспективным сырьевым решением выступает тыква (*Cucurbita moschata* Duch.), характеризующаяся высоким естественным содержанием β -каротина — ключевого провитамина А, дефицит которого широко распространен у населения северных территорий (Irwan et al., 2020). Однако биодоступность и сохранность каротиноидов в готовых продуктах сильно зависят от выбранной технологии переработки.

Для преодоления указанных ограничений эффективным подходом является ферментативная обработка сырья, в частности ферментализация тыквенного пюре. Ранее было показано, что данная обработка повышает содержание свободных сахаров и экстрагируемого β -каротина, что потенциально улучшает его биодоступность (Рожнов и др., 2025). Сухое ферментализованное тыквенное пюре (ФТП) демонстрирует высокий потенциал в качестве базы для различных пищевых систем, включая концентраты супов и напитков. Тем не менее, вопросы оптимизации его концентрации в рецептурах для достижения целевых органолептических и нутрициологических характеристик остаются недостаточно изученными.

Для расширения спектра биоактивных соединений и формирования гармоничного вкусоароматического профиля сухих концентратов быстрого приготовления целесообразно комбинировать тыквенную основу с дикорастущими ягодами Сибири — облепихой (*Hippophae rhamnoides* L.) и брусникой (*Vaccinium vitis-idaea* L.). Данные культуры характеризуются высоким содержанием полифенольных соединений, органических кислот, витаминов и других биоактивных веществ (Azmat et al., 2023; Kidoń et al., 2022).

При этом интеграция ягодных полуфабрикатов в сухие смеси требует учета их не только нутрициологической, но и технологической ценности. Использование продуктов переработки дикоросов, в частности сухих экстрактов и, особенно, вторичных ресурсов (шротов), образующихся при производстве соков и экстрактов, полностью соответствует современной парадигме ресурсосбережения и принципам циркулярной экономики в пищевой промышленности (Singh et al., 2020). Порошки из ягодных шротов, сохраняя значительную долю пищевых волокон и связанных полифенолов, выполняют двойную функцию: выступают как обогатители микронутриентами и как натуральные структурообразователи благодаря выраженной водоудерживающей способности (Budnith et al., 2023; Dilrukshi et al., 2021). Несмотря на доказанный потенциал отдельных компонентов, синергетическое влияние их комбинаций на физико-химические и органолептические свойства сухих концентратов напитков быстрого приготовления в доступной литературе системно не описано.

¹ https://rosstat.gov.ru/free_doc/new_site/zdor23/PublishSite_2023/index.html. Итоги выборочного федерального статистического наблюдения «Состояние здоровья населения» в 2023 году

Комбинирование каротиноидсодержащего растительного сырья, такого как тыква, с ягодами, богатыми полифенолами и кислотами, представляет собой перспективную стратегию, направленную на преодоление ограничений монокомпонентных систем. С точки зрения пищевой химии, полифенолы способны стабилизировать каротиноиды от окислительной деградаци, а органические кислоты повышают их биодоступность и эмульгируемость в водных средах. Как показано в ряде исследований (Jahangeer et al., 2025; Latifi et al., 2025), такие комбинации дают синергетический эффект: итоговый продукт получается с высокой антиоксидантной активностью (превышающей аддитивный вклад отдельных ингредиентов) и вполне приемлемыми вкусовыми характеристиками.

В качестве оптимальной пищевой матрицы для реализации данной стратегии выступает формат инстантных смузи. Современный потребительский тренд на функциональные напитки, замещающие полноценные приемы пищи (Chermon et al., 2024), предъявляет специфические требования к данному продукту: высокая вязкость, быстрая регидратация и сбалансированный нутриентный профиль (Castillejo et al., 2016; Rozhnov et al., 2020). При этом большинство существующих разработок ориентированы на использование свежих или замороженных компонентов (Napiórkowska et al., 2024), что создаёт серьёзные логистические ограничения и существенно сокращает срок годности готовых напитков: свежие смузи хранятся в холодильнике не более пары дней, а замороженные требуют непрерывного поддержания низких температур на всех этапах дистрибуции. Альтернативой выступают сухие концентраты быстрого приготовления (инстантные) — их срок годности достигает 12 месяцев и более при хранении при комнатной температуре, они компактны и устойчивы к микробной порче при надлежащей упаковке (Dilrukshi et al., 2021).

Сухие концентраты смузи решают логистические задачи, особенно актуальные для северных регионов, однако их создание требует точного подбора структурообразующих и вкусоароматических компонентов. При этом в доступной литературе отсутствуют исследования, посвященные совместному использованию ферментолитованного тыквенного пюре и продуктов глубокой переработки сибирских дикоросов в сухих инстантных системах.

Существующий пробел в знаниях заключается в следующем: (а) не изучена роль сухого ферментолитованного

тыквенного пюре как базового матрикса для напитков типа смузи; (б) не оценено влияние одновременного внесения сухих экстрактов и вторичных продуктов переработки (шротов) облепихи и брусники на свойства готового продукта; (в) отсутствует количественная оценка синергетического взаимодействия указанных компонентов в контексте их влияния на водоудерживающую способность, смачиваемость, текстурные характеристики и органолептические показатели продукта. В частности, остаётся неясным, какой из типов ягодных полуфабрикатов (экстракты или шроты) вносит определяющий вклад в формирование целевой консистенции смузи и как их комбинация модифицирует биохимический профиль напитка по сравнению с моновариантами.

Цель исследования заключалась в разработке рецептур инстантных напитков типа смузи на основе сухого ФТП, обогащённого экстрактами и шротами облепихи и брусники, с достижением высоких органолептических характеристик, обеспечением целевого содержания β -каротина, а также оценкой функционально-технологического и синергетического эффекта комбинаций растительных полуфабрикатов.

Исследовательские вопросы:

RQ#1: Каковы физико-химические и функционально-технологические характеристики сухих экстрактов и шротов облепихи и брусники, и как они определяют технологическую роль каждого компонента в рецептуре?

RQ#2: Какая концентрация ферментолитованного тыквенного пюре необходима для достижения целевого содержания β -каротина в порции напитка (не менее 20 % от суточной нормы) при сохранении типичной для смузи консистенции?

RQ#3: Как различные комбинации экстрактов и шротов облепихи и брусники влияют на органолептический профиль и содержание биоактивных веществ (каротиноидов и полифенолов) в готовом смузи, и какая рецептура обеспечивает максимальный синергетический эффект?

Для проверки сформулированных исследовательских вопросов и обоснования экспериментального дизайна были выдвинуты рабочие гипотезы. Первая гипотеза опирается на доказанную способность ферментолитовышать экстракцию и биодоступность каротиноидов тыквы и предполагает, что использование ФТП в составе смузи позволит преодолеть типичный для северных

регионов дефицит провитамина А в формате напитков быстрого приготовления. Вторая гипотеза базируется на известной комплементарности полифенольных и кислотных профилей облепихи и брусники, а также на предположении, что их совместное применение усилит вкусоароматический баланс. Третья гипотеза предполагает, что полифенолы выступают не только как функциональные нутриенты, но и как активные модуляторы вкусового восприятия, что должно проявиться в статистически значимой корреляции с органолептической оценкой.

Рабочие гипотезы исследования:

H₁: Использование сухого ФТП в комбинации с сухими экстрактами и шротами облепихи и брусники позволит обеспечить содержание β-каротина в порции напитка на уровне не менее 20 % от рекомендуемой суточной нормы.

H₂: Совместное применение экстрактов облепихи и брусники обеспечит синергетический эффект в формировании органолептического профиля, статистически значимо превышающий показатели моносоставных образцов.

H₃: Между содержанием полифенольных соединений и комплексной органолептической оценкой напитка существует статистически значимая корреляция, подтверждающая их роль в модуляции сенсорных характеристик.

Верификация данных гипотез осуществлялась посредством физико-химического анализа, дескрипторно-профильной органолептической оценки и корреляционного моделирования (критерий Спирмена).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объектами на разных этапах исследования служили: сухое ферментолитованное тыквенное пюре (ФТП), продукты переработки облепихи и брусники, образцы порошкообразных смесей для приготовления напитков типа смузи, образцы готовых напитков типа смузи.

ФТП получали по ранее разработанной авторами технологии (Рожнов и др., 2025; Rozhnov et al., 2026) из плодов тыквы сорта «Россиянка» (урожай 2024 г., Алтайский край); содержание β-каротина в использованном в ис-

следовании ФТП составляет $4,39 \pm 0,08$ мг/100 г, массовая доля влаги — $4,4 \pm 0,2$ %, размер частиц — менее 0,25 мм.

Продукты переработки облепихи (*Hippophae rhamnoides* L.) и брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.) представляли собой сухие экстракты (ООО «КиТ плюс», г. Бийск, Алтайский край) со следующими характеристиками: экстракт облепихи (ЭО) — порошкообразный продукт желто-коричневого цвета с характерным запахом облепихи, кислым вкусом; экстракт брусники (ЭБ) — порошкообразный продукт розовато-коричневого цвета с характерным ароматом брусники, кисло-сладким вкусом. Продукты переработки вторичных ресурсов облепихи и брусники — порошки, получаемые в результате высушивания и измельчения шрота, образующегося после водной экстракции ягод облепихи (ПШО) и ягод брусники (ПШБ). Облепиховый и брусничный шроты (ООО «КиТ плюс», г. Бийск, Алтайский край), высушивали в вакуумном сушильном шкафу при температуре 70 °С. Сушку осуществляли до конечной влажности продукта не более 5 %. Высушенные образцы шротов измельчали на лабораторной мельнице до размера частиц не более 0,25 мм, классификацию частиц осуществляли с использованием лабораторного сита с комплектом сит.

Рецептуры сухих порошкообразных смесей для приготовления смузи приведены в Таблице 1. Контрольные образцы напитков включали только ФТП в количестве 9, 12 и 15 % в пересчете на порцию готового напитка (200 г); опытные образцы напитков типа смузи готовили по рецептурам Таблицы 1.

Оборудование

В работе использовали следующее оборудование: аналитические весы HR-100AZ (A&D, Япония); сушильный шкаф ШС-80-01 СПУ (Смоленское СКТБ СПУ, Россия); вакуумный сушильный шкаф LT-VO/50 (Labtex, Россия); спектрофотометр UV-1800 (Shimadzu, Япония); рН-метр рН-150МИ (НПО Измерительная техника, Россия); центрифуга Liston C-2201 (Листон, Россия); лабораторный смеситель СЛ-6 (Технотест, Россия); лабораторная мельница DM-6 (HsiangTay, Тайвань); лабораторный рассев РЛ1-МТ (Мототех, Россия); комплект сит 0,04-10,0 мм (Крафт, Россия).

Методы исследования

Массовую долю влаги определяли методом высушивания до постоянной массы по ГОСТ 15113.4-2021 «Кон-

У.Д. Рожнов, М.Н. Школьников, О.Н. Мусина

Таблица 1
Рецептуры сухих смесей для приготовления смузи (на 100 г смеси)

Table 1
Formulations of Dry Mixes for Smoothie Preparation (per 100 g of mixture)

Компонент, г	Контроль (ФТП)	ФТП + ЭО	ФТП + ЭО + ПШО	ФТП + ЭБ	ФТП + ЭБ + ПШБ	ФТП + ЭО + ЭБ
ФТП	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Сахар	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Экстракт облепихи (ЭО)	—	25,0	12,5	—	—	12,5
Шрот облепихи (ПШО)	—	—	12,5	—	—	—
Экстракт брусники (ЭБ)	—	—	—	25,0	12,5	12,5
Шрот брусники (ПШБ)	—	—	—	—	12,5	—
ИТОГО	75,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Примечание. Контрольный образец содержит только ФТП и сахар, поэтому сумма компонентов составляет 75 г на 100 г сухой смеси. Опытные образцы дополнительно содержат экстракты и шроты дикоросов, доводящие сумму компонентов до 100 г. При приготовлении готового напитка (50 г сухой смеси + 200 мл воды) содержание ФТП во всех образцах составляет 30 г на 250 г напитка (12 %).

Note. The control sample consists solely of FTP and sugar, hence the sum of components is 75 g per 100 g of dry mixture. The experimental samples also include wild plant extracts and meals, which make up the remaining 25 g to reach 100 g. Upon reconstitution (50 g dry mix + 200 mL water), the FTP concentration in all samples is 30 g per 250 g of beverage (12 %).

центраты пищевые. Гравиметрические методы определения массовой доли влаги». Содержание суммы полифенольных соединений — спектрофотометрическим методом Фолина-Чокальтеу (Nikolaeva T.N. et al., 2022), результаты выражали в мг эквивалента галловой кислоты (GAE) на 1 г сухой массы. Содержание β-каротина — по ГОСТ ISO 6558-2 «Фрукты, овощи и продукты их переработки. Определение содержания каротина спектрофотометрическим методом». Кислотность готовых напитков определяли по ГОСТ 6687.4 «Напитки безалкогольные, квасы и сиропы. Метод определения кислотности».

Для порошкообразных ингредиентов определяли водоудерживающую способность (ВУС, г/г), жиroadерживающую способность (ЖУС, г/г), смачиваемость (с) и насыпную плотность (г/дм³). ВУС и ЖУС измеряли методом центрифугирования (Kundu et al., 2014), для оценки ЖУС использовали рафинированное подсолнечное масло. Смачиваемость изучали по методу, описанному в работе (Gong et al., 2008), а насыпную плотность — в работе (Jinapong et al., 2008).

Органолептический анализ готовых напитков проводили по ГОСТ 6687.5 «Производство безалкогольной промышленности. Методы определения органолептических показателей и объема продукции» профильным методом. Дескрипторно-профильную оценку проводили оценщики (n = 10) по 5-балльной шкале с шагом 0,5 балла для следующих показателей: внешний вид,

цвет, запах, вкус, консистенция, послевкусие. Коэффициенты весомости показателей устанавливали экспертным методом с учетом специфики продукта (напиток типа смузи): внешний вид — 0,10; цвет — 0,10; запах — 0,20; вкус — 0,30; консистенция — 0,20; послевкусие — 0,10. Комплексный показатель качества рассчитывали как сумму произведений средних баллов на соответствующие веса (Suyanto et al., 2024).

Процедура исследования

В качестве ключевых анализируемых показателей выбраны содержание β-каротина и сумма полифенольных соединений. β-каротин выбран как целевой нутриент для коррекции дефицита провитамина А, характерного для населения северных территорий (Irwani et al., 2020; Новикова и др., 2023). Полифенолы как показано ранее (Osakabe et al., 2024), вносят существенный вклад в органолептический профиль продуктов. Оба показателя имеют стандартизованные и воспроизводимые методы анализа, что обеспечивает валидность сравнения образцов. Иные ценные компоненты сырья (витамин С, минеральные вещества, органические кислоты, пектины) не входили в число целевых критериев на данном этапе исследования.

Порошкообразные смеси напитков получали дозированием сухих компонентов в соответствии с рецептурами (Таблица 1), с последующим перемешиванием в лабораторном смесителе в течение 10 мин.

Готовый напиток получали путем смешивания 50 г сухой смеси с 200 мл воды комнатной температуры (20–22 °С), тщательного перемешивания и настаивания в течение 5 мин для полной регидратации. Выбор воды комнатной температуры обусловлен спецификой потребления смузи как прохладительного напитка, который может употребляться со льдом, что исключает использование горячей воды. Для корректировки вкуса образцов напитков типа смузи использовали сахар белый (ГОСТ 33222-2015 «Сахар белый. Технические условия»).

Для подтверждения рациональной концентрации ФТП в рецептуре готовили образцы с содержанием ФТП 9, 12 и 15 % в пересчете на порцию готового напитка (250 г). Оценивали органолептические показатели и консистенцию. Целевое содержание каротиноидов рассчитывали, исходя из содержания β-каротина в ФТП и рекомендуемой суточной нормы потребления 5 мг (МР 2.3.1.0253-21).

Анализ данных

Для каждого показателя рассчитывали среднее арифметическое значение (М) и стандартное отклонение (SD). Достоверность различий между образцами оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с последующим применением критерия Тьюки — для сравнения средних значений показателей между тремя и более группами при нормальном распределении. Нормальность распределения количественных признаков проверяли по критерию Шапиро-Уилка отдельно для каждой группы (во всех случаях распределение не отличалось от нормального, $p > 0,05$); гомогенность дисперсий проверяли крите-

рием Ливена. Для органолептических данных, которые не всегда подчиняются нормальному распределению, использовали непараметрический критерий Краскела-Уоллиса с попарными сравнениями по U-критерию Манна-Уитни с поправкой Бонферрони. Для выявления взаимосвязи между показателями рассчитывали ранговый коэффициент корреляции Спирмена (ρ), устойчивый к выбросам и ненормальному распределению. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Представлены результаты в порядке, соответствующем логике исследования: сначала характеристика сырьевых ингредиентов (сухих экстрактов и порошков шротов), затем обоснование рациональной концентрации ФТП в напитке, далее органолептическая оценка 6 разработанных рецептур и физико-химический анализ 3 наиболее перспективных образцов.

Анализ физико-химических и функционально-технологических свойств сухих экстрактов облепихи и брусники и порошков из шротов этих ягод

На первом этапе проведен анализ сухих экстрактов и порошков шротов облепихи и брусники по физико-химическим и функционально-технологическим свойствам. Результаты представлены в Таблице 2.

Сухие экстракты (ЭО, ЭБ) оказались богаче полифенолами — 38–42 мг GAE/г. У порошков шротов этот показатель ниже, на уровне 15–18 мг GAE/г. Однако они

Таблица 2

Характеристика продуктов переработки дикоросов (М ± SD, n=3)

Table 2

Characteristics of Processed Wild-Growing Berries (M ± SD, n=3)

Показатель	Экстракт облепихи (ЭО)	Шрот облепихи (ПШО)	Экстракт брусники (ЭБ)	Шрот брусники (ПШБ)
Массовая доля влаги, %	3,8 ± 0,2 ^a	5,2 ± 0,3 ^b	4,1 ± 0,2 ^a	5,4 ± 0,3 ^b
Содержание полифенолов, мг GAE/г	42,6 ± 1,8 ^a	18,4 ± 0,9 ^b	38,2 ± 1,5 ^c	15,7 ± 0,8 ^d
ВУС, г/г	2,1 ± 0,2 ^a	8,4 ± 0,4 ^b	2,4 ± 0,2 ^a	7,9 ± 0,4 ^b
ЖУС, г/г	1,2 ± 0,1 ^a	3,1 ± 0,2 ^b	1,3 ± 0,1 ^a	2,8 ± 0,2 ^b
Смачиваемость, с	18,5 ± 1,2 ^a	42,3 ± 2,5 ^b	20,1 ± 1,4 ^a	38,7 ± 2,3 ^b
Насыпная плотность, г/дм³	612 ± 15 ^a	324 ± 12 ^b	587 ± 14 ^a	356 ± 13 ^b

Примечание. Индексы (a, b, c, d) в строке указывают на значимые различия при $p < 0,05$ (ANOVA, критерий Тьюки).

Note. Subscripts (a, b, c, d) within a row indicate significant differences at $p < 0.05$ (ANOVA, Tukey's test).

У.Д. Рожнов, М.Н. Школьников, О.Н. Мусина

сохраняют до 40 % полифенолов от исходного содержания в экстрактах. Шроты демонстрируют высокую водоудерживающую способность (ВУС) — 7,9–8,4 г/г, тогда как у экстрактов она не превышает 2,4 г/г. Аналогичная картина и с жирудержанием (ЖУС).

Обоснование концентрации ФТП в сухой смеси, позволяющей обеспечить содержание каротиноидов в порции не менее 20 % от суточной нормы и получить консистенцию напитка, характерную для смузи

Для обоснования рациональной концентрации ФТП на первом этапе готовили модельные образцы, содержащие только ФТП и воду, без добавления сахара и экстрактов дикоросов. Концентрацию ФТП варьировали в диапазоне 9-15 % в пересчете на готовый напиток (Таблица 3).

Таблица 3
Влияние концентрации ФТП на свойства готового напитка

Показатель	9 % ФТП	12 % ФТП	15 % ФТП
Внешний вид и консистенция	Однородная, жидкая, нестабильная	Густая, однородная, кремовая	Чрезмерно густая, пастообразная
Вкус	Водянистый, слабо выраженный	Сладковатый, приятный, характерный	Сладковатый, излишне плотный
Содержание β-каротина, мг/100 г	0,40 ± 0,04	0,53 ± 0,06	0,66 ± 0,09
Степень удовлетворения суточной нормы каротиноидов порцией напитка, %	19,8	26,4	33,0

Таблица 4
Органолептическая оценка образцов напитков типа смузи (M ± SD, баллы с учетом весовых коэффициентов)

Показатель (вес)	Контроль (ФТП)	ФТП + ЭО	ФТП + ПШО	ФТП + ЭБ	ФТП + ПШБ	ФТП + ЭО + ЭБ
Внешний вид (0,10)	0,46 ± 0,02 ^a	0,47 ± 0,02 ^{ab}	0,48 ± 0,02 ^b	0,46 ± 0,02 ^a	0,47 ± 0,02 ^{ab}	0,47 ± 0,02 ^{ab}
Цвет (0,10)	0,47 ± 0,02 ^a	0,48 ± 0,02 ^{ab}	0,48 ± 0,02 ^{ab}	0,47 ± 0,02 ^a	0,47 ± 0,02 ^a	0,49 ± 0,02 ^b
Запах (0,20)	0,84 ± 0,04 ^a	0,98 ± 0,04 ^c	0,94 ± 0,04 ^b	0,96 ± 0,04 ^{bc}	0,92 ± 0,04 ^b	1,02 ± 0,04 ^d
Вкус (0,30)	1,26 ± 0,05 ^a	1,44 ± 0,06 ^c	1,38 ± 0,06 ^b	1,41 ± 0,06 ^{bc}	1,35 ± 0,06 ^b	1,53 ± 0,06 ^d
Консистенция (0,20)	0,86 ± 0,03 ^a	0,88 ± 0,03 ^a	0,94 ± 0,03 ^b	0,88 ± 0,03 ^a	0,92 ± 0,03 ^b	0,90 ± 0,03 ^{ab}
Послевкусие (0,10)	0,42 ± 0,02 ^a	0,46 ± 0,02 ^b	0,45 ± 0,02 ^b	0,45 ± 0,02 ^b	0,44 ± 0,02 ^{ab}	0,47 ± 0,02 ^b
Комплексный балл	4,31 ± 0,10 ^a	4,71 ± 0,12 ^c	4,67 ± 0,11 ^{bc}	4,63 ± 0,11 ^b	4,57 ± 0,10 ^b	4,88 ± 0,13 ^d

Примечание. Различные надстрочные индексы в пределах одной строки обозначают статистически значимые различия ($p < 0,05$; критерий Краскела-Уоллиса с поправкой Бонферрони).

Note. Different superscripts within the same row indicate statistically significant differences ($p < 0.05$; Kruskal–Wallis test with Bonferroni correction).

Установлено, что концентрация 9 % является недостаточной — напиток имеет жидкую консистенцию, не соответствующую ожиданиям потребителей от продукта категории «смузи», и слабовыраженный вкус. Концентрация 15 % приводит к образованию чрезмерно густой, пастообразной массы, которую сложно отнести к напиткам.

Разработка вариантов рецептур смузи с различными комбинациями ягодных полуфабрикатов и оценка их органолептических свойств

На основе результатов предыдущих этапов разработаны 6 вариантов рецептур сухой смеси для приготовления смузи, приведенные в Таблице 1. Все варианты содержали фиксированное количество ФТП (60 г/100 г смеси) и сахара (15 г/100 г смеси), выбранное для создания приятного кисло-сладкого вкуса в комбинации

У.Д. Рожнов, М.Н. Школьников, О.Н. Мусина

с кислыми ягодными компонентами. Вариативными компонентами выступали экстракты и шроты облепихи и брусники. Органолептическая оценка готовых напитков проводилась по разработанной системе с весовыми коэффициентами. Результаты представлены в Таблице 4. Наилучшие органолептические показатели у образцов: ФТП + ЭО, ФТП + ЭБ и ФТП + ЭО + ЭБ.

Анализ содержания ключевых биоактивных веществ (каротиноидов и полифенолов) в готовых напитках с наилучшими органолептическими характеристиками

Для трех наиболее перспективных по органолептическим показателям образцов напитков типа смузи (ФТП + ЭО, ФТП + ЭБ и ФТП + ЭО + ЭБ) проведена детальная физико-химическая оценка (Таблица 5).

Таблица 5
Физико-химические показатели готовых напитков (M ± SD, n=3)

Table 5
Physicochemical Properties of The Ready-To-Drink Smoothie (M ± SD, n=3)

Показатель	ФТП + ЭО	ФТП + ЭБ	ФТП + ЭО + ЭБ
Массовая доля сухих веществ, %	18,5 ± 0,3 ^a	18,3 ± 0,3 ^a	18,7 ± 0,3 ^a
Кислотность, см ³ NaOH/100 см ³	4,2 ± 0,2 ^a	3,8 ± 0,2 ^b	4,5 ± 0,2 ^a
Содержание полифенолов, мг GAE/100 г	42,8 ± 1,8 ^a	38,5 ± 1,6 ^b	48,3 ± 2,0 ^c
Содержание β-каротина, мг/100 г	1,03 ± 0,06 ^a	0,53 ± 0,03 ^b	0,78 ± 0,04 ^c
Удовлетворение суточной нормы каротиноидов в порции напитка, %	51,6	26,6	39,0

Примечание. Различные надстрочные индексы в пределах одной строки обозначают статистически значимые различия (p < 0,05).
Note. Different superscripts within the same row indicate statistically significant differences (p < 0.05).

Расчет ранговой корреляции по Спирмену между составом, свойствами ингредиентов и качеством готовых напитков

Для формализации анализа связей между составом, свойствами ингредиентов и качеством готовых напитков типа смузи рассчитали корреляции по Спирмену. Матрица коэффициентов представлена в Таблице 6.

Таблица 6
Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (ρ)
Table 6
Spearman's Rank Correlation Coefficients (ρ)

Показатель	Содержание полифенолов в образце	Кислотность	Комплексный органолептический балл
Содержание полифенолов в образце	1,00	0,62*	0,81*
Кислотность	0,62*	1,00	0,58
Комплексный органолептический балл	0,81*	0,58	1,00

Примечание. Знак* — корреляция статистически значима при p < 0,05.
Note. * – correlation is statistically significant at p < 0.05.

Выявлена сильная положительная корреляционная связь (ρ = 0,81; p < 0,05) между содержанием полифенольных соединений в готовом напитке и его комплексной органолептической оценкой. Также установлена умеренная положительная корреляция (ρ = 0,62; p < 0,05) между содержанием полифенолов и кислотностью.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в работе данные подтвердили, что сухие экстракты (ЭО, ЭБ) богаче полифенолами (38-42 мг GAE/г) чем порошки шротов облепихи и брусники (15-18 мг GAE/г). При этом установлено, что порошки шротов сохраняют до 40 % полифенолов от исходного содержания в экстрактах, что согласуется с современными исследованиями Budnimath et al., (2023), Dilrukshi et al. (2021), Pedisić et al. (2025); Janceva et al. (2026), показавшими перспективность использования отходов переработки растительного сырья, в том числе ягод в качестве функциональных ингредиентов. Более заметны различия в технологических свойствах: ВУС и ЖУС шротов в 2-3 раза выше, чем у экстрактов, что объясняется наличием пищевых волокон, остающихся в шроте после отделения сока (Jagelaviciute et al., 2025). Шроты медленнее смачиваются и имеют более низкую насыпную плотность — сочетание свойств, типичное для пористых волокнистых материалов (Szydłowska et al., 2024; Šimkutė et al., 2025).

Выявленные различия определяют роль каждого типа ингредиентов в формировании свойств готового напитка. Экстракты, обладающие высоким содержанием полифенолов и хорошей растворимостью, будут пре-

имущественно определять вкусоароматический профиль и антиоксидантную активность. Порошки шротов, благодаря высокой ВУС, могут выполнять функцию натуральных загустителей и стабилизаторов, способствуя формированию характерной для смузи густой консистенции и обогащая продукт пищевыми волокнами.

Авторами по результатам исследований признана рациональной концентрация ФТП 12% в готовом напитке, при которой формируется густая, однородная, кремовая консистенция, достигается сбалансированный вкус. При 9% напиток имел жидкую нестабильную консистенцию, не соответствующую ожиданиям потребителей от смузи. При 15% формировалась пастообразная масса, что делает продукт непригодным для позиционирования как напиток. Концентрация ФТП 12% обеспечила содержание β -каротина 1,32 мг на порцию (26,4% от рекомендуемой суточной нормы потребления), что значительно превышает целевой показатель в 20%.

Анализ органолептических характеристик (Таблица 4, Рисунок 1) образцов смузи, приготовленных из сухой смеси по рецептурам, представленным в таблице 1 позволяет установить следующее. Контрольный образец (ФТП) получил ожидаемо низкие оценки по запаху и вкусу (4,2 и 4,2 балла соответственно), что подтверждает необходимость введения вкусоароматических добавок для создания гармоничного продукта.

Образцы с облепихой (ФТП + ЭО и ФТП + ЭО + ПШО) продемонстрировали высокие органолептические показатели. Вариант ФТП + ЭО получил комплексный балл 4,71, характеризовался ярким, приятным облепиховым ароматом и кисло-сладким, освежающим вкусом. Вариант ФТП + ЭО + ПШО имел несколько более низкие оценки по вкусу (4,6 против 4,8), что может быть связано с легкой терпкостью, привносимой шротом, однако его консистенция была оценена выше (4,7 против 4,4), что подтверждает структурирующую роль пищевых волокон шрота. Образцы с брусникой (ФТП + ЭБ и ФТП + ЭБ + ПШБ) также получили высокие оценки, уступая, однако, облепиховым вариантам по интенсивности и привлекательности аромата. Брусника придавала напитку более мягкий, «благородный» кисловатый вкус. Вариант ФТП + ЭБ был оценен выше, чем вариант ФТП + ЭБ + ПШБ, по тем же причинам, что и в случае с облепихой.

Наивысший комплексный балл (4,88) получил образец с комбинацией экстрактов облепихи и брусники

(ФТП + ЭО + ЭБ), статистически значимо превосходя все остальные варианты ($p < 0,05$). Полученные результаты согласуются с наблюдениями о синергетическом эффекте комбинации различных видов растительного сырья для создания продуктов с улучшенными сенсорными характеристиками (Kidoń et al., 2022; Jahangeer et al., 2025; Kolniak-Ostek et al., 2025; Espinosa et al., 2024). Оценщики отмечали сложный гармоничный аромат с нотами обеих ягод, сбалансированный кисло-сладкий вкус, приятное, освежающее послевкусие. По консистенции данный образец также не уступал лидерам. Образцы с одним видом экстракта (ФТП + ЭО или ФТП + ЭБ) получили более низкие, но всё ещё высокие оценки (4,71 и 4,63 соответственно). Интересно, что добавление шротов (ПШО или ПШБ) несколько снижало органолептические оценки по вкусу и запаху, но повышало оценку консистенции, что подтверждает структурирующую роль пищевых волокон, как ранее было показано для смузи (Dilrukshi et al., 2021).

Результаты оценки физико-химических свойств трех наилучших по органолептическим показателям образцов (ФТП + ЭО, ФТП + ЭБ и ФТП + ЭО + ЭБ) подтвердили их высокую пищевую ценность, в первую очередь за счет большого содержания ключевых биоактивных веществ — каротиноидов и полифенолов.

Все исследуемые образцы характеризуются близкими значениями массовой доли сухих веществ (18,3–18,7%). Содержание β -каротина закономерно различается в зависимости от состава образцов. Наименьшее значение отмечено для образца ФТП + ЭБ (0,53 мг/100 г). В образце ФТП + ЭО содержание β -каротина выше (1,03 мг/100 г) что обусловлено дополнительным поступлением каротиноидов из экстракта облепихи. Промежуточное положение образца ФТП + ЭО + ЭБ (0,78 мг/100 г) связано с меньшим количеством экстракта облепихи (12,5 г против 25 г в ФТП + ЭО). Различия между всеми тремя образцами статистически значимы ($p < 0,05$).

Оценка пищевой ценности показала, что мы не просто достигли целевого показателя, а перекрыли его с запасом. Порция готового напитка (250 г, или 50 г сухой смеси) дает от 26,6 до 51,6% от суточной нормы β -каротина, что заметно выше планируемых 20%.

По содержанию полифенолов лидирует образец ФТП + ЭО + ЭБ (48,3 мг GAE/100 г), что статистически значимо выше, чем в вариантах с одним видом сырья ($p < 0,05$). Этот эффект может быть объяснён аддитив-

ным и, возможно, синергетическим взаимодействием полифенольных комплексов облепихи и брусники, что ранее согласуется с известными наблюдениями (Latifi et al., 2025; Saleem et al., 2022; Leicht et al., 2025; Kurin et al., 2025): при смешивании разных растительных экстрактов общее содержание полифенолов часто увеличивается.

Кислотность по всем образцам колебалась в пределах 3,8-4,5 см³ NaOH/100 см³. Самый низкий показатель оказался у варианта с брусникой (ФТП + ЭБ), что хорошо согласуется с дегустационными оценками (вкус заметно мягче).

Выявленная сильная положительная корреляция между содержанием полифенольных соединений в смузи и его органолептической оценкой ($\rho = 0,81$) подтверждает значительный вклад полифенолов в формирование вкусоароматического профиля ягодных напитков, что согласуется с данными (Najman et al., 2022; Pinto et al., 2026; Osakabe et al., 2024; Leicht et al., 2025) о роли полифенолов в сенсорном восприятии. Умеренная положительная корреляция между содержанием полифенолов и кислотностью ($\rho = 0,62$) объясняется присутствием органических кислот в экстрактах дикоросов.

Инстантные смузи разработаны как продукт функционального питания для профилактики дефицита β -каротина и полифенолов у населения, проживающего в экстремальных климатических условиях Арктической зоны РФ. Продукт может быть рекомендован для взрослых и пожилых людей. Противопоказания: индивидуальная непереносимость компонентов, возраст до 3 лет, острые и хронические заболевания желудочно-кишечного тракта в стадии обострения (гастрит, язвенная болезнь).

В ответ на RQ#1 установлено, что сухие экстракты и порошки шротов обладают комплементарными технологическими ролями: экстракты выступают концентрированными носителями полифенолов и вкусоароматических соединений, а шроты благодаря выраженной ВУС и волокнистой структуре могут эффективно выполнять функцию натуральных структурообразователей, обеспечивая формирование густой консистенции напитков типа смузи.

В ответ на RQ#2 установлено, что оптимальная концентрация ФТП составляет 12 % от массы готового напитка, поскольку именно этот уровень обеспечивает баланс между характерной для напитков типа смузи конси-

стенцией и гарантированным достижением целевого показателя по содержанию β -каротина (26,4 % суточной нормы в порции).

В ответ на RQ#3 установлено, что комбинирование экстрактов облепихи и брусники с ФТП обеспечивает статистически значимый синергетический эффект, приводя к наивысшей комплексной органолептической оценке (4,88 балла) и максимальному содержанию полифенольных соединений в готовом напитке; при этом подтверждена гипотеза о сильной положительной корреляции ($\rho = 0,81$) между уровнем полифенолов и сенсорным восприятием продукта, что обосновывает выбор рецептуры ФТП + ЭО + ЭБ в качестве итоговой.

Ограничения исследования

Настоящее исследование имеет ряд ограничений, которые следует учитывать при интерпретации результатов и планировании будущих работ.

Выборка дегустаторов ($n = 10$) была относительно небольшой, при этом участники представляли собой однородную группу (специалисты в области пищевых технологий), что ограничивает валидность органолептических оценок: профессионалы могут иметь иные сенсорные пороги и предпочтения по сравнению с обычными потребителями. Кроме того, отсутствовало потребительское тестирование на репрезентативной выборке, что ограничивает внешнюю валидность результатов.

Не оценивались такие параметры разработанных напитков как стабильность при хранении (кинетика деградации каротиноидов и полифенолов), антиоксидантная активность в динамике, биодоступность биоактивных компонентов с использованием моделей пищеварения *in vitro* или *in vivo*. Статистический анализ ограничен корреляционными методами и непараметрическими тестами; не применялись многомерные подходы (например, факторный анализ), которые позволили бы глубже понять связь между составом смесей и их свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование подтвердило научную обоснованность и практическую возможность создания инстантных функциональных напитков на основе ферментализованного тыквенного пюре и продуктов

У.Д. Рожнов, М.Н. Школьников, О.Н. Мусина

переработки облепихи и брусники. Цель исследования достигнута: разработана рецептура instantного смузи, объединяющая высокую биологическую ценность с отличными органолептическими характеристиками.

Наиболее значимым результатом стало доказательство возможности использования вторичных ресурсов (шротов облепихи и брусники) как функционально-технологических ингредиентов — натуральных загустителей, способных модифицировать текстурные свойства напитков без ухудшения их приемлемости. Это расширяет представления о потенциале ресурсосберегающих технологий в пищевой промышленности.

Разработанная рецептура готова к промышленной апробации. Instantный смузи рекомендован для профилактики дефицита каротиноидов и полифенолов, особенно для населения, проживающего в экстремальных климатических условиях, включая Арктическую зону РФ. Сухая форма продукта обеспечивает логистические преимущества: минимальный вес и объем упаковки, минимальные требования к условиям хранения и транспортировки, что важно для регионов с ограниченной инфраструктурой. Простота приготовления готового напитка (разведение водой комнатной температуры) делает продукт технологически доступным в различных условиях. Одновременно, высокое содержание β -каротина и полифенолов позволяет эффективно компенсировать микронутриентный дефицит, характерный для северных территорий.

В дальнейшем планируется потребительское тестирование на репрезентативной выборке, изучение кинетики деградации биоактивных соединений при хранении, определение срока годности с использованием ускоренных тестов, обоснование типа упаковки, оценка биодоступности ключевых нутриентов с использованием

моделей *in vitro*, а также сравнение антиоксидантной активности с коммерческими аналогами.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Рожнов Евгений Дмитриевич: разработка концепции; формальный анализ; проведение исследования; разработка методологии; визуализация; написание черновика рукописи; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Школьников Марина Николаевна: разработка концепции; формальный анализ; проведение исследования; разработка методологии; визуализация; валидация результатов; написание черновика рукописи; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Мусина Ольга Николаевна: получение финансирования; административное руководство исследовательским проектом; научное руководство; визуализация; написание черновика рукописи; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Rozhnov Evgeny Dmitrievich: conceptualization; formal analysis; investigation; methodology; visualization; writing — original draft preparation; writing — review & editing.

Shkolnikova Marina Nikolaevna: conceptualization; formal analysis; investigation; methodology; visualization; validation; writing — original draft preparation; writing — review & editing.

Musina Olga Nikolaevna: funding acquisition; project administration; supervision; visualization; writing — original draft preparation; writing — review & editing.

ЛИТЕРАТУРА

- Никогосян, К.М., Сутункова, М.П., Рябова, Ю.В., Мустафина, И.З., Минигалиева, И.А., Мажаева, Т.В., Батенёва В.А. & Шабардина Л.В. Обзор профилактических мероприятий, направленных на повышение устойчивости организма к неблагоприятным воздействиям антропогенных и климатических факторов окружающей среды северных территорий России. *Уральский медицинский журнал*, 24(2), 129-146.
<https://doi.org/10.52420/umj.24.2.129>
- Новикова, И. И., Романенко, С. П., Семенихина, М. В. Кругляков, П.В., Дегтева, Г.Н., Рождественская, Л.Н., Лачугин, А.П., & Шепелева, О.А. (2023). Оценка включения витаминно-минерального комплекса в рацион организационного питания работающих в условиях Арктической зоны. *Российская Арктика*, 5(3), 40-47.
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-3-40-47>

- Рожнов, Е. Д., Школьников, М. Н., Аббазова, В. Н. & Захаров, В. Л. Высушенный ферментализованный полуфабрикат из мякоти тыквы как основа для пищевых систем. *Ползуновский вестник*. (1), 58-68. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.006>
- Azmat, F., Imran, A., Islam, F., et al. (2023). Valorization of the phytochemical profile, nutritional composition, and therapeutic potentials of garlic peel: A concurrent review. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 254-269. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2251713>
- Budnimath, S. H., Bhuvaneshwari, G., Ganiger, V. M., et al. (2023). Physical, reconstitution and phenolic properties of instant drink mix prepared with Moringa oleifera leaf, raw banana and whey protein concentrate. *Measurement: Food*, 11, 100108. <https://doi.org/10.1016/j.meafop.2023.100108>
- Castillejo, N., Martínez-Hernández, G. B., Gómez, P. A., et al. (2016). Red fresh vegetables smoothies with extended shelf life as an innovative source of health-promoting compounds. *Journal of Food Science and Technology*, 53(3), 1475-1486. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2143-2>
- Chermon, D., Gelman, O., & Birk, R. (2024). Blending towards healthier lifestyles: the impact of regular fruit and vegetable smoothie consumption on dietary patterns and sustainable health behaviors. *American journal of health promotion*, 38(8), 1210-1216. <https://doi.org/10.1177/08901171241258552>
- Dhiman, A. K., Vidiya, N., Surekha, A., & Preethi, R. (2017). Studies on development and storage stability of dehydrated pumpkin based instant soup mix. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(3), 1815-1820. <https://doi.org/10.31018/JANS.V9I3.1444>
- Dilrukshi, S. H. B., & Senarath, H. P. S. (2021). Development and quality evaluation of freeze-dried instant green smoothie powder. *International Journal of Food Science*, 2021, 6634764. <https://doi.org/10.1155/2021/6634764>
- Espinosa, A., Castro, P., Castañeda, J., & Toalá, J. (2024). Antioxidant activity and sensory acceptability of whey protein-based smoothie beverages made from mango (*Mangifera indica* L.) cv Haden and strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) cv Festival. *Agro Productividad*, 17(2), 135-142. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i2.2789>
- Gong, Z., Zhang, M., Mujumdar, A. S., et al. (2008). Spray drying and agglomeration of instant bayberry powder. *Drying Technology*, 26(1), 116-121. <https://doi.org/10.1080/07373930701781751>
- Gorbachev, V., Nikitin, I., Velina, D., Zhuchenko, N., Kosenkov, A., Sokolov, A., Zavalishin, I., Stolyarova, A., & Nikulchev, E. (2023). The impact of social well-being on population diet nutritional value and antiradical status. *Foods*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/foods12132619>
- Irwan, W. S., Setiawan, B., & Sulaeman, A. (2020). Development of high beta-carotene instant cream of pumpkin (*Cucurbita moschata*) soup for the elderly. *Current Developments in Nutrition*, 4(S2), 35. https://doi.org/10.1093/cdn/nzaa040_035
- Jagelaviciute, J., Šimkutė, S., Kairė, A., Kaminskytė, G., Bašinskienė, L., & Čižeikienė, D. (2025). Physicochemical characterization of soluble and insoluble fibers from berry pomaces. *Gels*, 11(10):796. <https://doi.org/10.3390/gels11100796>
- Jahangeer, A., Khalid, S., Chaudhary, K., et al. (2025). Development and characterization of a ready-to-serve functional drink of pumpkin-mango juice blend enriched with defatted pomegranate seed extract. *Food Chemistry Advances*, 7, 100997. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100997>
- Janceva, S., Petersone, L., Zaharova, N., Schastnaja, K., Rieksts, G., & Andersone, A. (2026). Valorization of sea buckthorn, black chokeberry, and black currant branch biomass as a novel source of bioactive oligomeric proanthocyanidins. *Plants*, 15(3), 472. <https://doi.org/10.3390/plants15030472>
- Jinapong, N., Suphantharika, M., & Jamnong, P. (2008). Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, 84(2), 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.032>
- Kidoń, M., & Uwineza, P. A. (2022). New smoothie products based on pumpkin, banana, and purple carrot as a source of bioactive compounds. *Molecules*, 27(10), 3049. <https://doi.org/10.3390/molecules27103049>
- Kolniak-Ostek, J., Kita, A., Giacalone, D., Vázquez-Araújo, L., Noguera-Artiaga, L., Brzezowska, J., & Michalska-Ciechanowska, A. (2025). Physicochemical and instrumental flavor analysis of plant-based drinks with plant powder additions. *Foods*, 14(15), 2593. <https://doi.org/10.3390/foods14152593>

- Kundu, H., Grewal, R. B., Goyal, A., et al. (2014). Effect of incorporation of pumpkin (*Cucurbita moschata*) powder and guar gum on the rheological properties of wheat flour. *Journal of Food Science and Technology*, 51(10), 2600-2607. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0777-x>
- Kurin, E., Hajská, M., Kostovčíková, E., Dokupilová, K., Mučaji, P., Nagy, M., Novotný, B., & Fialová, B. (2025). Unveiling synergistic antioxidant effects of green tea and peppermint: role of polyphenol interactions and blend preparation. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(13), 6257. <https://doi.org/10.3390/ijms26136257>
- Latifi, Z., Hassanzadeh, H., Ahmed, S. A., & Daneshniya, M. (2025). Development and characterization of the herbal functional beverage based on the pumpkin and cruciferous plants extracts. *Discover Food*, 5(1), 264. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00577-2>
- Leicht, K., Okpala, C., Nowicka, P., Pérez-Álvarez, J., & Korzeniowska, M. (2025). Antioxidant, polyphenol, physical, and sensory changes in myofibrillar protein gels supplemented with polyphenol-rich plant-based additives. *Nutrients*, 17(7), 1232. <https://doi.org/10.3390/nu17071232>
- Najman, K., Król, K., & Sadowska, A. (2022). The physicochemical properties, volatile compounds and taste profile of black garlic (*Allium sativum* L.) cloves, paste and powder. *Applied Sciences*, 12(9), 4215. <https://doi.org/10.3390/app12094215>
- Napiórkowska, A., Khaneghah, A., & Kurek, M. (2024). Essential oil nanoemulsions — A new strategy to extend the shelf life of smoothies. *Foods*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/foods13121854>
- Nikolaeva, T.N., Lapshin, P.V., & Zagorskina N.V. (2022). Method for determining the total content of phenolic compounds in plant extracts with Folin-Denis reagent and Folin-Ciocalteu reagent: Modification and comparison. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 48(7), 1519-1525. <https://doi.org/10.1134/S1068162022070214>
- Osakabe, N., Shimizu, T., Fujii, Y., Fushimi, T., & Calabrese, V. (2024). Sensory nutrition and bitterness and astringency of polyphenols. *Biomolecules*, 14(2), 234. <https://doi.org/10.3390/biom14020234>
- Pedisić, S., Zorić, Z., Repajić, M., Levaj, B., Dobrinčić, A., Balbino, S., Čošić, Z., Dragović-Uzelac, V., & Elez Garofulić, I. (2025). Valorization of berry fruit by-products: bioactive compounds, extraction, health benefits, encapsulation and food applications. *Foods*, 14(8), 1354. <https://doi.org/10.3390/foods14081354>
- Pinto, T., Vilela, A., & Cosme, F. (2026). Bioactive compounds and the organoleptic characteristics of functional foods: mechanisms and technological innovations. *Processes*, 14(3), 529. <https://doi.org/10.3390/pr14030529>
- Rozhnov, E. D., Shkolnikova, M. N., & Musina, O. N. (2026). Kinetics and mechanism of carotenoid degradation in pumpkin powder: Effect of storage temperature and packaging atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*, 64(2), 162-172. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-1-165-176>
- Rozhnov, E. D., Shkolnikova, M. N., Kazarskikh, A. O., et al. (2020). Formation of rheological characteristics of vegetable and fruit smoothies to ensure their quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 613(1), 012125. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012125>
- Saleem, M., Ahmad, Z., Waseem, M., et al. (2025). Nutritional, physicochemical, and antioxidant characterization of pomegranate, beetroot, and carrot concentrates supplemented functional whey beverages. *Food Chemistry: X*, 25, 102206. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102206>
- Šimkutė, S., Bašinskienė, L., Sympas, M., & Čižeikienė, D. (2025). Composition and technological properties of modified lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) pomace. *Applied Sciences*. 15(7), 3661. <https://doi.org/10.3390/app15073661>
- Singh, V., & Kaur, K. (2020). Development, formulation and shelf-life evaluation of baby corn soup mix from industrial by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 1917-1925. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04227-1>
- Suyanto, A., Ayuningtyas, A., & Yonata, D. (2024). Physicochemical and sensory characteristics of instant pumpkin soup with variations of porang flour as a thickener. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 12(2), 727-736. <https://doi.org/10.12944/crnfsj.12.2.19>
- Szydłowska, M., Wojdyło, A., & Nowicka, P. (2024). Black and red currant pomaces as raw materials to create smoothies with in vitro health-promoting potential. *Foods*, 13(17), 2715. <https://doi.org/10.3390/foods13172715>
- Wang, R., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2010). Effect of food ingredient on microwave freeze drying of instant vegetable soup. *LWT — Food Science and Technology*, 43(7), 1144-1150. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.03.007>

REFERENCES

- Azmat, F., Imran, A., Islam, F., et al. (2023). Valorization of the phytochemical profile, nutritional composition, and therapeutic potentials of garlic peel: A concurrent review. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 254-269. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2251713>
- Budnimath, S. H., Bhuvaneshwari, G., Ganiger, V. M., et al. (2023). Physical, reconstitution and phenolic properties of instant drink mix prepared with Moringa oleifera leaf, raw banana and whey protein concentrate. *Measurement: Food*, 11, 100108. <https://doi.org/10.1016/j.meafao.2023.100108>
- Castillejo, N., Martínez-Hernández, G. B., Gómez, P. A., et al. (2016). Red fresh vegetables smoothies with extended shelf life as an innovative source of health-promoting compounds. *Journal of Food Science and Technology*, 53(3), 1475-1486. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2143-2>
- Chermon, D., Gelman, O., & Birk, R. (2024). Blending towards healthier lifestyles: the impact of regular fruit and vegetable smoothie consumption on dietary patterns and sustainable health behaviors. *American journal of health promotion*, 38(8), 1210-1216. <https://doi.org/10.1177/08901171241258552>
- Dhiman, A. K., Vidiya, N., Surekha, A., & Preethi, R. (2017). Studies on development and storage stability of dehydrated pumpkin based instant soup mix. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(3), 1815-1820. <https://doi.org/10.31018/JANS.V9I3.1444>
- Dilrukshi, S. H. B., & Senarath, H. P. S. (2021). Development and quality evaluation of freeze-dried instant green smoothie powder. *International Journal of Food Science*, 2021, 6634764. <https://doi.org/10.1155/2021/6634764>
- Espinosa, A., Castro, P., Castañeda, J., & Toalá, J. (2024). Antioxidant activity and sensory acceptability of whey protein-based smoothie beverages made from mango (*Mangifera indica* L.) cv Haden and strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) cv Festival. *Agro Productividad*, 17(2), 135-142. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i2.2789>
- Gong, Z., Zhang, M., Mujumdar, A. S., et al. (2008). Spray drying and agglomeration of instant bayberry powder. *Drying Technology*, 26(1), 116-121. <https://doi.org/10.1080/07373930701781751>
- Gorbachev, V., Nikitin, I., Velina, D., Zhuchenko, N., Kosenkov, A., Sokolov, A., Zavalishin, I., Stolyarova, A., & Nikulchev, E. (2023). The impact of social well-being on population diet nutritional value and antiradical status. *Foods*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/foods12132619>
- Irwan, W. S., Setiawan, B., & Sulaeman, A. (2020). Development of high beta-carotene instant cream of pumpkin (*Cucurbita moschata*) soup for the elderly. *Current Developments in Nutrition*, 4(S2), 35. https://doi.org/10.1093/cdn/nzaa040_035
- Jagelaviciute, J., Šimkutė, S., Kairė, A., Kaminskytė, G., Bašinskienė, L., & Čižeikienė, D. (2025). Physicochemical characterization of soluble and insoluble fibers from berry pomaces. *Gels*, 11(10):796. <https://doi.org/10.3390/gels11100796>
- Jahangeer, A., Khalid, S., Chaudhary, K., et al. (2025). Development and characterization of a ready-to-serve functional drink of pumpkin-mango juice blend enriched with defatted pomegranate seed extract. *Food Chemistry Advances*, 7, 100997. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100997>
- Janceva, S., Petersone, L., Zaharova, N., Schastnaja, K., Rieksts, G., & Andersone, A. (2026). Valorization of sea buckthorn, black chokeberry, and black currant branch biomass as a novel source of bioactive oligomeric proanthocyanidins. *Plants*, 15(3), 472. <https://doi.org/10.3390/plants15030472>
- Jinapong, N., Suphantharika, M., & Jamnong, P. (2008). Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, 84(2), 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.032>
- Kidoń, M., & Uwinea, P. A. (2022). New smoothie products based on pumpkin, banana, and purple carrot as a source of bioactive compounds. *Molecules*, 27(10), 3049. <https://doi.org/10.3390/molecules27103049>
- Kolniak-Ostek, J., Kita, A., Giacalone, D., Vázquez-Araújo, L., Noguera-Artiaga, L., Brzezowska, J., & Michalska-Ciechanowska, A. (2025). Physicochemical and instrumental flavor analysis of plant-based drinks with plant powder additions. *Foods*, 14(15), 2593. <https://doi.org/10.3390/foods14152593>

- Kundu, H., Grewal, R. B., Goyal, A., et al. (2014). Effect of incorporation of pumpkin (*Cucurbita moschata*) powder and guar gum on the rheological properties of wheat flour. *Journal of Food Science and Technology*, 51(10), 2600-2607. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0777-x>
- Kurin, E., Hajská, M., Kostovčíková, E., Dokupilová, K., Mučaji, P., Nagy, M., Novotný, B., & Fialová, B. (2025). Unveiling synergistic antioxidant effects of green tea and peppermint: role of polyphenol interactions and blend preparation. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(13), 6257. <https://doi.org/10.3390/ijms26136257>
- Latifi, Z., Hassanzadeh, H., Ahmed, S. A., & Daneshniya, M. (2025). Development and characterization of the herbal functional beverage based on the pumpkin and cruciferous plants extracts. *Discover Food*, 5(1), 264. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00577-2>
- Leicht, K., Okpala, C., Nowicka, P., Pérez-Álvarez, J., & Korzeniowska, M. (2025). Antioxidant, polyphenol, physical, and sensory changes in myofibrillar protein gels supplemented with polyphenol-rich plant-based additives. *Nutrients*, 17(7), 1232. <https://doi.org/10.3390/nu17071232>
- Najman, K., Król, K., & Sadowska, A. (2022). The physicochemical properties, volatile compounds and taste profile of black garlic (*Allium sativum* L.) cloves, paste and powder. *Applied Sciences*, 12(9), 4215. <https://doi.org/10.3390/app12094215>
- Napiórkowska, A., Khaneghah, A., & Kurek, M. (2024). Essential oil nanoemulsions — A new strategy to extend the shelf life of smoothies. *Foods*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/foods13121854>
- Nikogosyan, K., Sutunkova, M., Ryabova, Y., Mustafina, I., Minigalieva, I., Mazhaeva, T., Bateneva, V., & Shabardina, L. (2025). Review of preventive measures aimed at increasing the body resistance to adverse effects of anthropogenic and climatic factors of the environment in the northern territories of Russia. *Ural Medical Journal*, 24(2), 129-146. (In Russ.) <https://doi.org/10.52420/umj.24.2.129>
- Nikolaeva, T.N., Lapshin, P.V., & Zagorskina N.V. (2022). Method for determining the total content of phenolic compounds in plant extracts with Folin-Denis reagent and Folin-Ciocalteu reagent: Modification and comparison. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 48(7), 1519-1525. <https://doi.org/10.1134/S1068162022070214>
- Novikova, I. I., Romanenko, S. P., Semenikhina, M. V., Kruglyakov, P.V., Degteva, G.N., Rozhdestvenskaya, L.N., Lachugin, A.P., & Shepeleva, O.A. (2023). Assessment of inclusion of vitamin and mineral complex in the organizational nutrition of workers in the Arctic zone. *Russian Arctic*, 5(3), 40-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-3-40-47>
- Osakabe, N., Shimizu, T., Fujii, Y., Fushimi, T., & Calabrese, V. (2024). Sensory nutrition and bitterness and astringency of polyphenols. *Biomolecules*, 14(2), 234. <https://doi.org/10.3390/biom14020234>
- Pedisić, S., Zorić, Z., Repajić, M., Levaj, B., Dobrinčić, A., Balbino, S., Čošić, Z., Dragović-Uzelac, V., & Elez Garofulić, I. (2025). Valorization of berry fruit by-products: bioactive compounds, extraction, health benefits, encapsulation and food applications. *Foods*, 14(8), 1354. <https://doi.org/10.3390/foods14081354>
- Pinto, T., Vilela, A., & Cosme, F. (2026). Bioactive compounds and the organoleptic characteristics of functional foods: mechanisms and technological innovations. *Processes*, 14(3), 529. <https://doi.org/10.3390/pr14030529>
- Rozhnov, E. D., Shkolnikova, M. N., Abbazova, V. N., & Zakharov, V. L. (2025). Dried fermented semi-finished product from pumpkin pulp as a base for food systems. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], (1), 58-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.006>
- Rozhnov, E. D., Shkolnikova, M. N., & Musina, O. N. (2026). Kinetics and mechanism of carotenoid degradation in pumpkin powder: Effect of storage temperature and packaging atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*, 64(2), 162-172. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-1-165-176>
- Rozhnov, E. D., Shkolnikova, M. N., Kazarskikh, A. O., et al. (2020). Formation of rheological characteristics of vegetable and fruit smoothies to ensure their quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 613(1), 012125. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012125>
- Saleem, M., Ahmad, Z., Waseem, M., et al. (2025). Nutritional, physicochemical, and antioxidant characterization of pomegranate, beetroot, and carrot concentrates supplemented functional whey beverages. *Food Chemistry: X*, 25, 102206. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102206>
- Šimkutė, S., Bašinskienė, L., Syrpas, M., & Čižeikienė, D. (2025). Composition and technological properties of modified lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) pomace. *Applied Sciences*. 15(7), 3661. <https://doi.org/10.3390/app15073661>

- Singh, V., & Kaur, K. (2020). Development, formulation and shelf-life evaluation of baby corn soup mix from industrial by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 1917-1925. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04227-1>
- Suyanto, A., Ayuningtyas, A., & Yonata, D. (2024). Physicochemical and sensory characteristics of instant pumpkin soup with variations of porang flour as a thickener. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 12(2), 727-736. <https://doi.org/10.12944/crnfsj.12.2.19>
- Szydlowska, M., Wojdyło, A., & Nowicka, P. (2024). Black and red currant pomaces as raw materials to create smoothies with in vitro health-promoting potential. *Foods*, 13(17), 2715. <https://doi.org/10.3390/foods13172715>
- Wang, R., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2010). Effect of food ingredient on microwave freeze drying of instant vegetable soup. *LWT — Food Science and Technology*, 43(7), 1144-1150. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.03.007>

ОБ АВТОРАХ

Рожнов Евгений Дмитриевич, доктор технических наук, научный сотрудник лаборатории «АлтайБиоЛакт» Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3982-9700>, Scopus ID: 50462502800, Researcher ID: W-6663-2018, SPIN-код: 4621-3360, red@bti.secna.ru

Школьникова Марина Николаевна, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «АлтайБиоЛакт» Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9146-6951>, Scopus ID: 57218252488, Researcher ID: B-4318-2017, SPIN-код: 2551-2375, bt@bti.secna.ru

Мусина Ольга Николаевна, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории «АлтайБиоЛакт» Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>, Scopus ID: 57190978449, Researcher ID: J-5620-2014, SPIN-код: 4121-3990, musinaon@altgtu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Rozhnov Evgeny Dmitrievich, Dr. Sci. (Eng.), Researcher of the Laboratory «AltaiBioLakt» at the Polzunov Altai State Technical University (656038, Russian Federation, Barnaul, Lenin ave., 46), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3982-9700>, Scopus ID: 50462502800, Researcher ID: W-6663-2018, SPIN-code: 4621-3360, red@bti.secna.ru

Shkolnikova Marina Nikolaevna, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory «AltaiBioLakt» at the Polzunov Altai State Technical University (656038, Russian Federation, Barnaul, Lenin ave., 46), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9146-6951>, Scopus ID: 57218252488, Researcher ID: B-4318-2017, SPIN-code: 2551-2375, bt@bti.secna.ru

Musina Olga Nikolaevna, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher of the Laboratory «AltaiBioLakt» at the Polzunov Altai State Technical University (656038, Russian Federation, Barnaul, Lenin ave., 46), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>, Scopus ID: 57190978449, Researcher ID: J-5620-2014, SPIN-code: 4121-3990, musinaon@altgtu.ru

Пищевая биотехнология: инновационные методы, микроорганизмы и их потенциал (аналитический обзор)

Е.М. Серба

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, г. Москва, Российская Федерация

Корреспонденция:
Елена Михайловна Серба
E-mail: serbae@mail.ru

Конфликт интересов:
автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 02.01.2026
Принята: 15.06.2026
Опубликована: 30.06.2026

Финансирование:
Исследование выполнено в рамках государственного задания FGMF-2025-0012.

Copyright: © 2026 Автор

АННОТАЦИЯ

Введение: Потенциал пищевой биотехнологии для создания функциональных ингредиентов, биологически активных добавок и специализированной продукции широко обсуждается в литературе последнего десятилетия. Однако работ, в которых накопленные данные не просто перечисляются, а оцениваются с точки зрения доказательной обоснованности, заметно меньше.

Цель: Систематизировать ключевые направления пищевой биотехнологии и определить, какие из них опираются на воспроизводимые экспериментальные данные, а какие остаются на уровне деклараций, на материале публикаций 2015–2025 годов.

Материалы и методы: Проанализированы 130 полнотекстовых публикаций из баз РИНЦ, PubMed и Google Scholar. Материал сгруппирован в четыре тематических блока: генная и клеточная инженерия; биокаталитическая переработка сырья; ферментация для снижения аллергенности и получения функциональных продуктов; фортификация микроорганизмов. Для каждого блока оценивались масштаб экспериментов, наличие независимых подтверждений и систематические пробелы.

Результаты: Биокаталитическая переработка зернового сырья оказалась единственным направлением, где лабораторные данные подкреплены промышленной практикой. В трёх остальных объём лабораторных работ заметно превосходит объём данных о безопасности, биодоступности и клинической эффективности. Наиболее выраженный разрыв между декларируемым потенциалом и доказательной базой обнаружен в области генной и клеточной инженерии и в утверждениях о противоопухолевых свойствах ферментированных продуктов.

Выводы: Доказательная база пищевой биотехнологии асимметрична: при значительном объёме лабораторных данных систематические исследования безопасности, масштабируемости и клинической эффективности фрагментарны. Приоритетом дальнейших работ представляется не умножение новых объектов, а валидация уже существующих, переход к пилотному масштабу, исследования безопасности и контролируемые испытания *in vivo*.

Ключевые слова: пищевая биотехнология; аналитический обзор; доказательная база; биокатализ; генная инженерия; ферментация; фортификация; масштабирование; безопасность



Для цитирования: Серба, Е.М. (2026). Пищевая биотехнология: инновационные методы, микроорганизмы и их потенциал (аналитический обзор). *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 42–61. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.117>

Food Biotechnology: Innovative Methods, Microorganisms, and Their Potential (An Analytical Review)

Elena M. Serba

VNIIPBT is a branch of the Federal Research Centre of Nutrition and Biotechnology, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: The potential of food biotechnology for creating functional ingredients, dietary supplements, and specialized food products has been widely discussed in the literature of the past decade. Far fewer works, however, do not merely enumerate the accumulated data but appraise them in terms of the validity of the underlying evidence.

Purpose: To systematize the key directions of food biotechnology and to determine which of them rest on reproducible experimental data and which remain at the level of declarations, drawing on publications from 2015 to 2025.

Materials and Methods: A total of 130 full-text publications from the RSCI, PubMed, and Google Scholar databases were analyzed. The material was grouped into four thematic blocks: genetic and cell engineering; biocatalytic processing of raw materials; fermentation for allergenicity reduction and the creation of functional products; and fortification of microorganisms. For each block, the scale of experiments, the availability of independent confirmation, and systematic gaps were assessed.

Results: Biocatalytic processing of grain raw material proved to be the only direction in which laboratory data are supported by industrial practice. In the three remaining directions, the volume of laboratory work markedly exceeds the volume of data on safety, bioavailability, and clinical efficacy. The most pronounced gap between the declared potential and the available evidence was found in genetic and cell engineering and in claims about the antitumor properties of fermented products.

Conclusion: The evidence base of food biotechnology is asymmetric: against a substantial volume of laboratory data, systematic studies of safety, scalability, and clinical efficacy remain fragmentary. The priority for further work appears to be not the multiplication of new objects but the validation of those already proposed, namely the transition to pilot scale, safety studies, and controlled *in vivo* trials.

Keywords: food biotechnology; analytical review; evidence base; biocatalysis; genetic engineering; fermentation; fortification; scale-up; safety

Correspondence:

Elena M. Serba

E-mail: serbae@mail.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 02.01.2026

Accepted: 15.06.2026

Published: 30.06.2026

Funding:

The research was supported by subsidies for the implementation of state assignment (FGMF-2025-0012).

Copyright: © 2026 The Author



To cite: Serba, E.M. (2026). Food biotechnology: Innovative methods, microorganisms, and their potential (An analytical review). *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 42–61. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.117>

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение населения безопасными и качественными продуктами питания, включая функциональную и специализированную продукцию, заявлено в России в числе приоритетов государственной политики. В литературе последних лет решение этой задачи устойчиво связывается с ускоренным внедрением биотехнологических инноваций — прежде всего методов генетической и ферментативной инженерии и направленного использования микроорганизмов и их метаболитов (Сербя и др., 2018; Мезенова, 2023). Считается, что такие подходы позволяют не только повысить рентабельность производств, но и получать продукты с заданными свойствами, ориентированные на поддержание здоровья человека (Аксенова и Римарева, 2017; Сербя и др., 2023а). Основания биотехнологии как научной дисциплины, изучающей применение живых систем и их метаболитов для решения технологических задач, к настоящему времени достаточно полно систематизированы в учебной и справочной литературе (Фауст, 2015).

Масштаб ожиданий подкрепляется оценками рынка. По данным аналитических агентств, мировой рынок биотехнологий в 2024 году оценивается величиной порядка 1,5 трлн долларов США с прогнозом многократного роста к 2034 году; при этом оценки заметно расходятся в зависимости от источника, а сегмент именно пищевой биотехнологии в них, как правило, не выделяется (Сарсадских и Эйриян, 2025). Доля России на этом рынке составляет около 0,25 % — существенно ниже показателей США (36,5 %), Китая (5,1 %) и Германии (2,3 %). Отсутствие отдельной статистики по пищевому сегменту затрудняет точную оценку положения дел именно в рассматриваемой области и само по себе является значимым пробелом. Контекст этих процессов задаёт и положение аграрного сектора: при значительном ресурсном потенциале сохраняются проблемы продовольственных потерь и технологической модернизации производства (Карлова и др., 2023; Соколова и Сухарева, 2024).

В литературе последовательно указывается на дефицит российских биотехнологических продуктов: ферментов, функциональных ингредиентов, биологически активных добавок, усиливающий зависимость перерабатывающей промышленности от импорта (Сербя и др., 2018, 2023а; Мезенова, 2023). Имеющийся научный задел, как

утверждается, позволяет эффективно применять результаты разработок, однако ограниченные инвестиционные возможности затрудняют выбор среди множества технологических решений. Это утверждение, однако, не подкреплено количественными данными: систематических сведений о доле российских НИОКР в области пищевой биотехнологии, дошедших до промышленной реализации, в доступной литературе нет. В мировой практике разрыв между лабораторной разработкой и внедрением, так называемая «долина смерти», таков, что опытно-промышленной стадии достигают лишь 10–15 % биотехнологических исследований в пищевой сфере (Nielsen, Tillegreen & Petranovic, 2022); сопоставимых оценок для России не представлено. Преодоление этого разрыва требует кооперации науки, промышленности и государства, опирающейся в том числе на постгеномные дисциплины и биоэкономику (Ленчук, 2021; Ковальчук и др., 2019; Титова и др., 2023).

Несмотря на то, что объем данных, накопленных в области пищевой биотехнологии за десятилетие, велик; число работ, где эти данные не перечислены, а сопоставлены и оценены с точки зрения систематических пробелов, заметно меньше. Цель настоящего обзора заключается в систематизации и обобщении ключевых результатов исследований и в выявлении наименее изученных областей индустрии функциональных ингредиентов, биологически активных добавок, специализированной и обогащённой пищевой продукции, где биотехнологические инновации обещают наибольший эффект и где разрыв между ожиданиями и эмпирическими доказательствами проявляется особенно отчётливо.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Критерии включения и поиск источников

В обзор включали оригинальные исследовательские статьи и материалы конференций из рецензируемых изданий при одновременном выполнении трёх условий: соответствие тематики одному из четырёх выделенных направлений; доступность полного текста; дата публикации в интервале с 1 января 2015 года по 1 марта 2025 года. Поиск вели в базах РИНЦ, PubMed и Google Scholar по ключевым словам на русском и английском языках («пищевая биотехнология»/food biotechnology, «ферментация»/fermentation, «биокатализ»/biocatalysis, «генная инженерия»/genetic engineering, «фортификация»/fortification, «аллергенность»/allergenicity и др.). За-

просы строили парными комбинациями с оператором AND, синонимы объединяли оператором OR; стратегию адаптировали к каждой базе (в PubMed поиск ограничивали полями названия и аннотации, в Google Scholar использовали точные фразы в кавычках, в РИНЦ — рубрикатор).

Отбор проводили в два этапа: на первом по названиям и аннотациям исключали заведомо нерелевантные работы, на втором решение принимали по полному тексту. В итоговый анализ вошли 130 публикаций.

Извлечение и синтез данных

Для каждой публикации фиксировали объект исследования (вид сырья, штамм, ферментный препарат), метод, масштаб эксперимента (лабораторный, пилотный, промышленный), основные результаты и выводы в авторской формулировке, а также указанные авторами ограничения. Синтез проводили тематически. Структуру блоков задавали в два шага: сначала на пилотной выборке из 50 случайно отобранных аннотаций выявляли группы исследований по типу метода (ферментативный катализ, микробная ферментация, генетическая модификация, фортификация) и цели работы; затем выделяли направления, которые одновременно были частотными в выборке, обладали выраженным инновационным потенциалом по оценкам авторов и чётко различались по используемым методам. Так сформировались четыре блока:

- (1) генная и клеточная инженерия: направленное изменение генетического материала микроорганизмов (рекомбинантные штаммы) и культивирование клеток и тканей *in vitro*;
- (2) биокаталитическая переработка сырья: ферментные препараты микробного происхождения как основной инструмент гидролиза полимеров растительного, животного и микробного сырья, включая нетрадиционные источники и вторичные биоресурсы;
- (3) ферментация для снижения аллергенности и создания функциональных продуктов: экзогенные ферменты или подобранные штаммы (в том числе пробиотические) для обработки пищевого сырья;
- (4) фортификация микроорганизмов эссенциальными соединениями: использование микробной биомассы как матрицы для встраивания микроэлементов и других нутриентов.

Границы между блоками не абсолютны: статью, которую можно было отнести к двум блокам (например, реком-

бинантный штамм для ферментации сырья с целью снижения аллергенности), относили к блоку, отвечающему основной заявленной цели. Дополнительно ключевые утверждения классифицировали по степени обоснованности: подтверждённые независимыми группами; основанные на единичных работах без воспроизведения; гипотетические, опирающиеся на косвенные данные или аналогии. Эта градация не заменяет формальной оценки качества, но позволяет различать надёжные выводы и требующие проверки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Отобранные публикации распределились по четырем блокам неравномерно, как по числу работ, так и по характеру представленных данных. Ниже каждое направление рассматривается в логике «что заявлено — на чём это заявление основано — что осталось за рамками доказательств».

Технологии клеточной и генной инженерии

В анализируемых публикациях клеточная и генная инженерия предстают как два связанных, но различных подхода. Клеточная инженерия, по обобщающим работам (Kreis, 2019; Kumar et al., 2021; Popova et al., 2023), сосредоточена на создании растительных и животных клеточных культур с заданными характеристиками, культивируемых *in vitro*; возможности коллекций клеточных культур как источника биологически активных веществ описаны и в отечественной литературе (Цыбулько и Мясникова, 2020). Генная инженерия направлена на трансформацию генетического материала, прежде всего на получение рекомбинантных штаммов-продуцентов целевых ферментов (Kluge et al., 2018; Синицын и др., 2022; Филькин и др., 2024). Авторы подчеркивают взаимозависимость методов: генетические модификации меняют клеточные функции, а клеточная инженерия обеспечивает размножение измененных тканей *in vitro* (Bulakhov et al., 2017).

В качестве конкретного результата приводится создание высокопродуктивных рекомбинантных штаммов, секретирующих при оптимизированной ферментации до 80 % целевого гетерологичного белка от общего количества (Bulakhov et al., 2017); международный опыт получения промышленно важных ферментов на экспрессионных системах грибов обобщен в работах Синицына с соавторами (2022, 2023). Применительно

к пищевым технологиям выделяют получение рекомбинантных ферментов, улучшение текстуры и качества продуктов и, как потенциальное решение экологических и этических проблем животноводства, создание рекомбинантных аналогов белков молока и мяса (Тышко и др., 2020; Treich, 2021; Nielsen et al., 2024). К этому же кругу задач примыкают работы по альтернативным источникам белка и растительным аналогам молочных продуктов (Мирзаев и Эргашев, 2023; Шишкина и др., 2022). В клеточной инженерии центральным сюжетом остаётся возможность получать продукты, идентичные натуральным по составу, без участия животных и растений (Hettinga & Bijl, 2022); сами авторы, однако, оговаривают, что подтверждение такой «идентичности» требует более глубокого изучения на молекулярном уровне.

Доказательная база направления слаба. Подавляющее большинство работ описывает лабораторные результаты; данных о масштабировании до пилотного или промышленного уровня в выборке практически нет, а обзорные статьи ссылаются на зарубежные разработки, не приводя экспериментальных данных, полученных на российском материале. Необходимость строгого контроля производственного цикла: от подготовки клеточного материала и состава сред до анализа качества и безопасности продукции, авторы признают (Kumar et al., 2021; Jeske et al., 2022; Зайцева и др., 2023), но конкретных протоколов и результатов валидации таких систем не представляют; вопросы идентификации опасностей и критических контрольных точек при производстве культивируемого мяса лишь поставлены (Зайцева и др., 2023). В итоге значительный массив теоретических и обзорных работ фиксирует потенциал методов, тогда как оригинальных исследований, доведенных до стадии оценки промышленной применимости, крайне мало. Приведенные в обзорах оценки следует рассматривать как гипотетические, требующие подтверждения на конкретных экспериментальных моделях.

Биокаталитическая переработка сельскохозяйственного сырья и нетрадиционных биоресурсов

Этот блок наиболее представителен по числу публикаций. Его центральный инструмент — ферментные препараты микробного происхождения, субстратная специфичность и механизм действия которых определяются генетической принадлежностью и физиологией продуцентов (Римарева и др., 2017; Polyakov et al., 2021; Серба

и др., 2022b). Методами генной инженерии и индуцированного мутагенеза получены высокопродуктивные штаммы, синтезирующие промышленно значимые ферменты с повышенной каталитической активностью (Курбатова и др., 2017; Синицына и др., 2020; Попова и др., 2024); обоснование выбора и получение концентрированных ферментных комплексов отработаны и для конкретных субстратов (Волкова и др., 2023; Серба и др., 2023b); многоцелевое использование *Aspergillus oryzae* как продуцента комплекса гидролаз описано Римаревой с соавторами (2018).

Переработка зернового сырья

Детальнее всего изучена роль ферментативных систем в переработке многокомпонентного зернового сырья, что является следствием традиционной значимости бродильных производств, на которые приходится более 60% общего объема ферментных препаратов (Римарева и др., 2020). Ферменты, участвующие в конверсии зерна, систематизированы по группам субстратов, на которые они воздействуют (Таблица 1): крахмал гидролизуют α -амилазы, глюкоамилазы и пуллулазазы; некрахмальные полисахариды — ксиланазы, β -глюканазы и целлюлазы; белки — протеазы и трансглутаминаза; фитиновые вещества — фитазы (Римарева и др., 2021b; Серба и др., 2022b).

Особое значение имеет синергизм ферментов разных классов: совместное действие карбогидраз, протеаз и фитаз углубляет гидролиз высокомолекулярных полимеров зернового сырья, интенсифицирует генерацию дрожжей и спиртовое брожение и увеличивает выход продукции (Римарева и др., 2017; Rimareva et al., 2022). Фитолитические и протеолитические ферменты способствуют обогащению суслу редуцирующими углеводами, азотистыми веществами, фосфатами и минералами в биодоступной форме (Polyakov et al., 2019, 2021; Римарева и др., 2021a). Практическая отработка касается и сопряжения биокатализа с экструзией, включая переработку экструдированного крахмала в мальтодекстрины и глюкозные сиропы (Степанов и др., 2017; Амелякина и др., 2020; Шариков и др., 2021), и применения мультиэнзимных композиций в хлебопечении (Носова и др., 2020; Носова и Дремучева, 2023; Ладнова и др., 2023). Существенно, что в этом блоке присутствуют и работы по методологии контроля качества и безопасности самих ферментных препаратов (Серба и др., 2019b; Римарева и др., 2020), чего недостаёт другим направлениям.

Таблица 1
Ферменты для гидролиза полимеров зернового сырья

Table 1
Enzymes for the Hydrolysis of Grain Raw-Material Polymers

Основной фермент	Продуценты	t, °C	pH	Действие на субстрат и задачи применения	Целевое назначение
I. Биоконверсия крахмала (α-амилаза, глюкоамилаза, пуллуланаза)					
Бактериальная α-амилаза; термостабильная α-амилаза;	<i>Bacillus subtilis</i> ,	60–97	5,0–7,0	α-1,4-глюкан-4-глюканогидролаза (КФ 3.2.1.1), эндо-действие; гидролиз внутренних α-1,4-связей до декстринов и олигосахаридов	Разжижение и декстринизация крахмала, снижение вязкости замесов; подготовка к действию глюкоамилазы (спирт, пиво, хлеб)
грибная α-амилаза	<i>B. licheniformis</i> , <i>B. stearo-thermophilus</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Aspergillus oryzae</i>				
Глюкоамилаза	<i>Aspergillus awamori</i> , <i>A. niger</i>	55–65	4,1–5,0	α-1,4-глюканглюкогидролаза (КФ 3.2.1.3), экзо-действие; отщепление глюкозы от нередуцирующих концов, гидролиз α-1,4- и α-1,6-связей	Осахаривание расщеплённого крахмала, декстринов и олигосахаридов до глюкозы
Пуллуланаза	<i>Aerobacter aerogenes</i> , <i>Bacillus pullulans</i>	58–65	4,0–6,0	Эндо-действие; гидролиз α-1,6-связей в амилопектине и предельных декстринах до мальтоолигосахаридов	Спирт, пиво, кристаллическая глюкоза, глюкозо-фруктозные сиропы — интенсификация и рост выхода
II. Биоконверсия белков (протеазы, трансклутаминаза)					
Бактериальные и грибные протеазы (протеиназы, пептидазы)	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Aspergillus oryzae</i> , <i>A. niger</i>	50–60	4,7–10,0	Расщепление пептидных связей: протеиназы эндо-действия (КФ 3.4.21–24), пептидазы экзо-действия (КФ 3.4.11–15)	Гидролиз белков до пептидов разной молекулярной массы и далее до аминокислот
Трансклутаминаза	<i>Streptomyces mobaraensis</i>	48–60	6,0–7,5	Переаминирование и образование межмолекулярных пептидных связей между глутамином и лизином	Направленное изменение структуры и функциональных свойств белков
III. Биоконверсия некрахмальных полисахаридов (ксилаказы, β-глюканазы, целлюлазы)					
β-глюканаза, ксиланаза, целлюлаза	<i>Trichoderma viride</i> , <i>T. longibrachiatum</i> , <i>T. reesei</i>	50–65	5,0–7,0	Гидролиз ксиланов, глюканов, целлюлозы и гемицеллюлозы	Снижение вязкости, рост биодоступности субстрата и выхода продукции
IV. Гидролиз фитиновых веществ (фитазы)					
Фитаза	<i>Aspergillus awamori</i> , <i>A. niger</i> , <i>Yarrowia lipolytica</i>	50–60	3,0–5,0	Мио-инозитолгексакисфосфат-фосфогидролаза (подкласс фосфатаз); высвобождение фосфора и микроэлементов	Повышение качества замесов и сула, обогащение фосфором и минеральными веществами

Примечание. Адаптировано из: Римарева и др. (2021b); Серб и др. (2022b).
Note. Adapted from Rimareva et al. (2021b); Serba et al. (2022b).

Нетрадиционные источники
и вторичные биоресурсы

Подбор ферментных систем для альтернативного сырья опирается на знание его химического состава и прогнозируемой степени деструкции (Римарева и др., 2020, 2024; Kawaguchi et al., 2022). Биомассу насекомых обсуждают как источник белка и жира и как средство переработки сельскохозяйственных отходов в кормовые добавки (Dobermann, Swift & Field, 2017; Kępińska-Pacelik & Biel, 2022; Рудакова и Рудаков, 2022); микробную биомассу: как источник полноценного бел-

ка, незаменимых аминокислот, витаминов и ценных полисахаридов (β-глюканов, маннанов) (Серб и др., 2017, 2023a; Kalebina & Rekestina, 2019; Gründling, 2021; Latgé et al., 2023; Gautam et al., 2025). Питательная ценность интактной микробной биомассы, как отмечают сами авторы, ограничена низкой доступностью содержимого клетки для пищеварительных ферментов, что предлагается преодолевать ферментативным расщеплением клеточных стенок (Serba et al., 2020b; Серб и др., 2020a, 2023a). Потенциал переработки вторичного сырья иллюстрируют и получение БАД из отходов виноделия (Касумова, 2024), и биологически активные добавки для

животных на основе вторичных биоресурсов микробного происхождения (Сербя и др., 2019а).

Доказательная база в этом тематическом блоке неоднородна. Для традиционных зерновых субстратов она развернута, тогда как для нетрадиционного сырья ограничивается декларациями потенциала. Авторы признают необходимость исследований по безопасности биомассы насекомых (Pinotti et al., 2019; Wilson Bessa et al., 2020; Shah et al., 2022), но публикаций с результатами токсикологических, микробиологических или аллергологических испытаний продуктов их переработки в выборке нет; по микробной биомассе исследований, в которых доказана безопасность полученных ингредиентов для человека, также практически нет. Даже для зерновых данные о масштабировании за пределы лаборатории фрагментарны, а масштаб эксперимента в исследованиях, в контексте которых разрабатываются собственные ферментные препараты, часто не указан явно. Несмотря на то, что это направление наиболее разработано из четырех, и оно сохраняет зоны неопределенности.

Ферментация для снижения аллергенности и создания функциональных продуктов

Блок объединяет работы, в которых ферментация (биокаталитическая или микробная) служит целенаправленному изменению свойств сырья ради двух задач: снижения сенсibilизирующей активности белков и придания продуктам функциональных, в том числе иммуномодулирующих и противоопухолевых, свойств. По числу публикаций он сопоставим с предыдущим, но материал смещен в сторону пищевых матриц (молоко, зерно, соя), а не микробной биомассы. Механизмы действия пробиотиков и их роль в создании функциональных продуктов обобщены в обзоре Plaza-Diaz с соавторами (2019), метаболитические свойства штаммов *Lactobacillus acidophilus* — у Стояновой с соавторами (2022), а классификация пищевых аллергенов и способы их элиминации описана Громовым с соавторами (2021).

По данным международной статистики, заболеваемость пищевой аллергией за два десятилетия выросла в 3–4 раза, и сегодня ею страдает примерно каждый пятый житель планеты (Ильина, 2022; Юраскина и др., 2023). Наиболее частые аллергены: белки яичного, молочного и зернового происхождения (Fernandes et al., 2018; Сновская и др., 2022). Основным биотехнологическим способом снижения аллергенности авторы

считают ферментативный гидролиз: протеолитические ферменты расщепляют белок на пептидные фрагменты с меньшей молекулярной массой и, как предполагается, меньшей сенсibilизирующей активностью, причем в гидролизатах сохраняются все аминокислоты, включая незаменимые (Rimareva et al., 2017; Соколова и др., 2022). Параллельно ферментативная и микробная обработка белкового сырья рассматривается как путь получения биоактивных пептидов с регуляторными функциями на молочных, мясных и коллагенсодержащих субстратах (Гришин и др., 2017; Милентьева и др., 2020; Чернуха и др., 2020; Мезенова и др., 2021).

Зерновое сырьё (глютен)

На пшенице показано, что обработка комплексом протеаз повышает содержание свободных аминокислот, особенно пролина (в 8,9 раза), аланина (в 6,1 раза) и серина (в 6,5 раза) относительно исходного сырья (Таблица 2). На основе частичной замены ферментативно модифицированной цельнозерновой муки разработаны хлеб и снеки с пониженной сенсibilизирующей активностью, причём перспективным признано сопря-

Таблица 2

Содержание свободных аминокислот в ферментолизатах зернового сырья

Table 2

Free Amino-Acid Content in Grain Raw-Material Fermentolysates

Аминокислота, %	Исходное сырьё без обработки	Ферментолизат пшеницы
Аспарагин	0,168	0,190
Треонин	0,272	0,660
Серин	0,054	0,350
Глутаминовая кислота	0,141	0,395
Пролин	0,044	0,390
Глицин	0,022	0,080
Аланин	0,027	0,165
Валин	0,340	0,415
Метионин	0,190	0,280
Изолейцин	0,094	0,240
Лейцин	0,380	0,620
Гистидин	0,304	0,890
Лизин	0,063	0,150
Триптофан	0,290	0,580

Примечание. Адаптировано из: Rimareva et al. (2017); Соколова и др. (2022).

Note. Adapted from Rimareva et al. (2017); Sokolova et al. (2022).

жение биокатализа с экструзией (Шариков и др., 2020; Соколова и др., 2022). Наряду с ферментативным гидролизом рассматривают микробную трансформацию микромицетами-продуцентами гидролаз (Серб и др., 2021a; Serba et al., 2021a) и закваски на молочнокислых бактериях и дрожжах: брожение теста с *Lactobacillus* сопровождается ростом содержания свободного пролина, глутаминовой и аспарагиновой кислот, что указывает на возможное снижение количества иммунореактивных пептидов (Di Cagno et al., 2002; Шариков и др., 2020; Меренкова и Петрушенко, 2025).

Молочное и соевое сырьё

Для гипоаллергенной молочной продукции установлена связь степени протеолиза пептидных фракций с их антигенностью и биологической активностью (антиоксидантной, антимикробной, антимутагенной) (Кручинин и Агаркова, 2020; Halavach et al., 2020, 2021); отработан и непрерывный гидролиз молочных белков в мембранных реакторах (Ryazantseva et al., 2021); казеиновые и глютеиновые фракции применяют для получения функциональных ингредиентов (Красноштанова и Шульц, 2022; Prikhodko & Krasnoshtanova, 2023), а ферментированные молочные продукты сложного сырьевого состава проявляют эмерджентные свойства (Соколова

Таблица 3

Содержание незаменимых аминокислот в белках исходного соевого сырья и ферментированных субстратов, г/100 г белка

Table 3

Essential Amino-Acid Content in the Proteins of the Initial Soy Raw Material and in Fermented Substrates (g per 100 g of protein)

Аминокислота	Эталон FAO/ВОЗ	Исходная среда	Биокатали- тическая конверсия	Микроб- ная кон- версия
Валин	5,0	4,11±0,19	4,21±0,18	5,60±0,21
Изолейцин	4,0	4,16±0,18	4,05±0,16	3,89±0,16
Лейцин	7,0	7,03±0,32	7,02±0,34	4,04±0,15
Лизин	5,5	5,28±0,22	5,65±0,21	7,17±0,32
Метионин	3,5	1,17±0,07	1,19±0,02	2,65±0,12
Треонин	4,0	3,26±0,17	3,48±0,15	3,92±0,16
Фенилаланин	6,0	0,28±0,01	0,67±0,03	2,16±0,09
Триптофан	1,0	1,07±0,06	1,21±0,06	15,40±0,64
Всего незаме- нимых АК	36,0	26,36±0,92	27,48±1,21	44,83±2,12

Примечание. Адаптировано из: Серб и др. (2021a); Serba et al. (2021a).

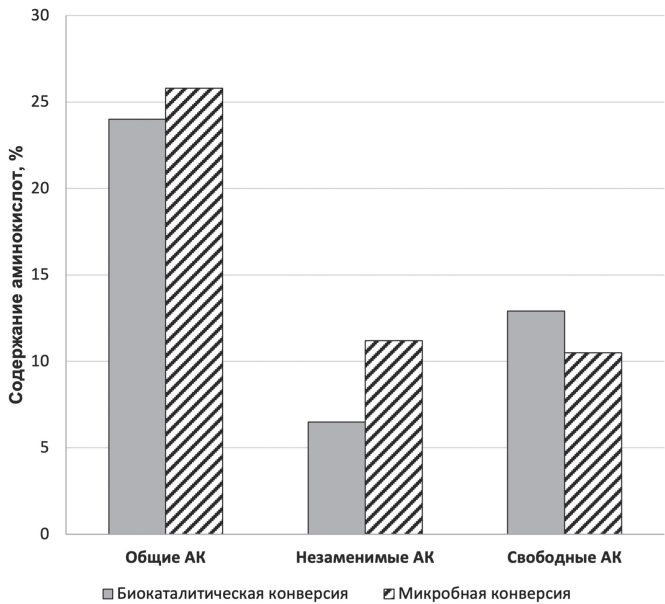
Note. Adapted from Serba et al. (2021a); Serba et al. (2021a).

Рисунок 1

Содержание аминокислот в ферментированной сое после биокаталитической и микробной конверсии

Figure 1

Amino-Acid Content in Fermented Soy after Biocatalytic and Microbial Conversion



Примечание. Адаптировано из Серб и др. (2021a); Serba et al. (2021a).

Note. Adapted from Serba et al. (2021a); Serba et al. (2021a).

и Федотова, 2023). На сое биокаталитические и биосинтетические процессы повышают растворимость белков и снижают иммунореактивность, а продукты приобретают новые вкусовые и медико-биологические свойства (Cao et al., 2019; Сидорова и др., 2019; Серб и др., 2023a). Сравнение двух способов ферментации сои показало, что микробная конверсия с участием *Aspergillus oryzae* повышает содержание незаменимых аминокислот в 1,7 раза, прежде всего лизина, метионина, фенилаланина и триптофана (Рисунок 1, Таблица 3); аминокислотный скор ряда незаменимых кислот в гидролизате превысил эталон FAO/ВОЗ (Серб и др., 2021a; Serba et al., 2021a).

Микробная биомасса

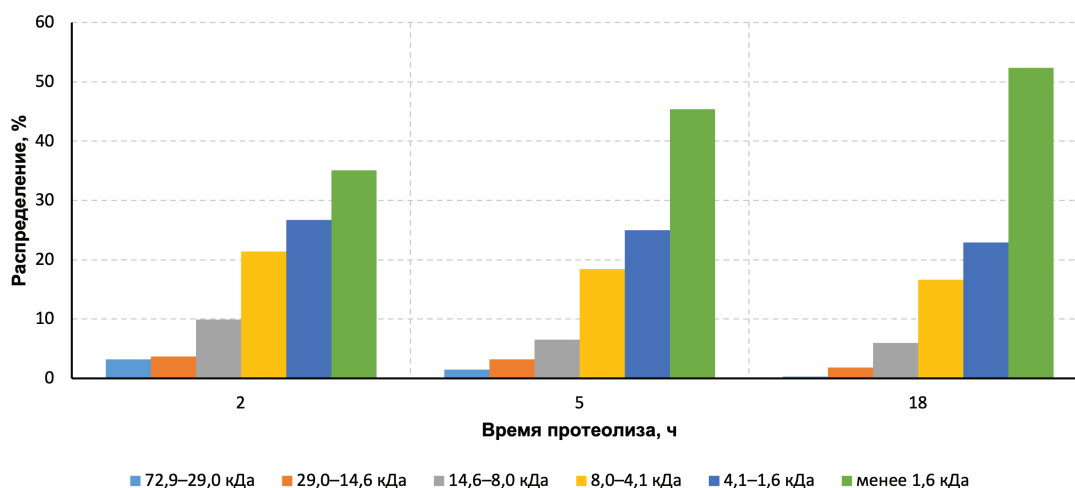
Биокаталитическая конверсия белков микробного сырья дает низкомолекулярные пептиды и свободные аминокислоты; молекулярно-массовое распределение пептидов в ходе ферментативной деструкции представлено на Рисунке 2 (Serba et al., 2020b). На основе деструкции дрожжевой и грибной биомассы создана

Рисунок 2

Молекулярно-массовое распределение пептидов в процессе ферментативной деструкции белков микробной биомассы, %

Figure 2

Molecular-weight distribution of peptides during the enzymatic degradation of microbial-biomass proteins, %



Примечание. Адаптировано из Serba et al. (2020b).

Note. Adapted from Serba et al. (2020b).

линейка белково-аминокислотных ингредиентов и БАД (Серба и др., 2020с, 2022а). Клинические испытания ферментоллизатов микробной биомассы подтвердили их эффективность в комплексной терапии больных аллергическими заболеваниями, в том числе атопическим дерматитом (Римарева и др., 2019; Serba et al., 2021b; Ревякина и др., 2022).

Функциональные свойства

Ряд авторов связывает с ферментированными продуктами противоопухолевые свойства (подавление роста раковых клеток через апоптоз и стимуляцию иммунитета) за счет биоактивных пептидов и фенольных соединений (Devanthi & Gkatzionis, 2019; Tasdemir & Sanlier, 2020; Serba et al., 2021b), оговаривая при этом недостаточность данных о минорных биоактивных составляющих. Ферментация пробиотическими культурами повышает сохранность и функциональность продуктов: метаболиты с повышенным синтезом экзополисахаридов рассматривают как биокорректоры, улучшающие адгезию лакто- и бифидобактерий (Пожидаева и др., 2023), а пробиотические закваски обогащают хлеб ну-

триентами и продлевают срок хранения (Dean et al., 2020; Меренкова и Петрушенко, 2025). Доказательный статус пробиотиков в медицинской практике остается предметом отдельного критического обсуждения (Плотникова и Захарова, 2025), а современные подходы к их применению включают инкапсуляцию пробиотических клеток и биоактивных соединений (Bazzaz et al., 2025). Расширяется и ассортимент: ферментированные напитки антиоксидантной направленности на зерновой основе (Меренкова и Резанова, 2022) и натуральные ингредиенты из биотехнологически модифицированного растительного сырья (Соколова и др., 2025b).

Доказательная база блока имеет выраженный перекос в сторону *in vitro* и *ex vivo*: снижение аллергенности подтверждается главным образом измерением молекулярной массы пептидов и аминокислотного состава, тогда как контролируемых клинических испытаний на людях с пищевой аллергией крайне мало. Исключением являются работы Ревякиной с соавторами (2022) и Serba et al. (2021b), но и в них размер выборки и дизайн описаны недостаточно полно. Утверждения о противоопухолевых и иммуномодулирующих свойствах остаются преи-

мущественно гипотетическими: ссылки идут на обзоры, а оригинальных исследований с демонстрацией эффектов *in vivo*, тем более на людях, в выборке практически нет. Таким образом, наиболее разработаны методы ферментативного гидролиза белков зернового, молочного и соевого сырья, а клиническая часть доказательной базы остается фрагментарной.

Фортификация микроорганизмов эссенциальными соединениями

Этот блок уступает остальным по числу публикаций, но выделен в самостоятельное направление: авторы рассматривают его как отдельную инновацию, а использование микробной биомассы в качестве матрицы для встраивания нутриентов (в отличие от прямой фортификации продуктов) меняет форму их представленности и, как предполагается, повышает биодоступность. Основной модельный объект — непатогенные дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*, выбор которых объясняют низкой осмочувствительностью, лабильностью к внешним воздействиям и высоким потенциалом целевого метаболического ответа (Серб и др., 2020b; Jordá & Puig, 2020).

Необходимость фортификации авторы обосновывают распространенностью дефицита микроэлементов: около 32 % населения испытывает недостаток эссенциальных микроэлементов, прежде всего железа, меди, цинка и хрома; дефицит железа и меди — основная причина железодефицитной анемии (около 20 % населения мира и порядка 39 % россиян), а недостаток цинка и хрома относят к факторам риска сахарного диабета II типа (Ayele et al., 2021; Dubey et al., 2020; Kumar et al., 2022; Соколова и др., 2025a). Традиционное обогащение готовых продуктов неорганическими солями признается малоэффективным из-за плохого усвоения, тогда как фортификация микроорганизмов переводит микроэлементы в органическую, предположительно более биодоступную форму (Król et al., 2017; Zhang et al., 2018; Krausova et al., 2021).

Описаны два способа обогащения. При прижизненном обогащении клетки культивируют на средах с микроэлементами в дозировках, не угнетающих рост, но стимулирующих синтез белка на 20–30 % (Серб и др., 2020b; Соколова и др., 2024; Юраскина и др., 2021). При пост-культивационной фортификации микроэлементы вводят в инактивированные клетки после ферментативной де-

струкции, что повышает степень встраивания на 38–89 % в зависимости от элемента; исследована и возможность сочетанного обогащения парами (Fe + Cu) и (Zn + Cr), при котором содержание микроэлементов покрывает свыше 15 % физиологической нормы (Серб и др., 2022a; Соколова и др., 2024, 2025a). Встраивание подтверждают методом молекулярно-массового распределения: основная часть микроэлементов ассоциирована с низкомолекулярными фракциями, что трактуют как переход из неорганической формы в органическую (Юраскина и др., 2023; Соколова и др., 2025a).

Именно эта трактовка и составляет уязвимое место направления. Доказательства «перехода в органическую форму» косвенны: молекулярно-массовое распределение показывает, с какими фракциями ассоциированы микроэлементы, но не доказывает ни ковалентной связи с органическими молекулами, ни повышенной биодоступности; прямые методы (EXAFS-спектроскопия, изотопная метка) не применялись. Исследования биодоступности *in vivo* единичны и выполнены на животных (Król et al., 2017; Zhang et al., 2018; Krausova et al., 2021), причем сравнивались разные формы микроэлементов вообще, а не именно те, что получены по описанным протоколам фортификации дрожжей; данных на людях нет. Отсутствуют и результаты токсикологической оценки при длительном применении и анализа возможных антагонизмов при сочетанном приеме пар микроэлементов. Технологические параметры проработаны детально, но ключевые утверждения об инновационной ценности подхода пока не имеют прямых доказательств: потенциал направления следует оценивать как многообещающий, но требующий верификации более строгими методами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ 130 публикаций за 2015–2025 годы выявил отчетливую асимметрию в разработанности четырёх направлений (Таблица 4). Наиболее полные данные, включающие промышленные апробации, относятся к биокаталитической переработке зернового сырья, что является следствием многолетней традиции бродительных производств. В трех других блоках преобладают лабораторные результаты, а свидетельства эффективности в условиях, приближенных к промышленным, единичны или отсутствуют.

Таблица 4
Сводная оценка доказательной базы по четырём направлениям пищевой биотехнологии

Table 4
Summary Appraisal of the Evidence Base across the Four Directions of Food Biotechnology

Направление	Достигнутый масштаб	Независимое воспроизведение	Данные о безопасности	Подтверждение <i>in vivo</i> / клин.	Уровень доказательности
Генная и клеточная инженерия	Лабораторный	Единичное (преим. обзоры)	Фрагментарные	Практически отсутствует	Низкий
Биокаталитическая переработка зернового сырья	Промышленный	Множественное	Есть (методология контроля ФП)	Частичное (бродильные производства)	Высокий
Ферментация: снижение аллергенности и функц. продукты	Лабораторный, отд. пилотный	Умеренное	Ограниченные	Единичные клин. испытания	Средний/низкий
Фортификация микроорганизмов	Лабораторный	Умеренное	Отсутствуют (долгосрочная)	Только на животных	Низкий

Примечание. Составлено автором по результатам анализа выборки; категории отражают экспертную классификацию утверждений по степени обоснованности.
Note. Compiled by the author from the results of the analysis; the categories reflect the expert classification of statements by degree of substantiation.

Все четыре блока объединяют три сквозных ограничения. Во-первых, эксперименты выполнены преимущественно в лабораторном масштабе, а данные о воспроизводимости при переходе к пилотным установкам практически отсутствуют. Во-вторых, дизайн исследований (контрольные группы, рандомизация, ослепление) описан фрагментарно или не описан вовсе. В-третьих, систематические исследования безопасности новых объектов (рекомбинантные штаммы, культивируемые клетки, гидролизаты нетрадиционного сырья, фортифицированные микроорганизмы) не представлены. Дополнительный признак — отсутствие в выборке работ с отрицательными результатами, указывающее на публикационное смещение.

Расхождение между декларациями и доказательствами

Между тоном многих обзорных публикаций, где пищевая биотехнология предстает областью на пороге масштабных технологических перемен, и фактической доказательной базой оригинальных исследований обнаруживается систематическое расхождение. Особенно заметно оно в двух областях. В генной и клеточной инженерии обзоры обсуждают промышленное производство культивируемого мяса и рекомбинантных белков молока (Kreis, 2019; Kumar et al., 2021), тогда как оригинальных работ, где такие продукты получены и проверены применительно к российским условиям, в выборке практически нет, соответственно, утверждения о скорой

промышленной реализации остаются гипотетическими. В области противоопухолевых свойств ферментированных продуктов обзоры обсуждают потенциал биоактивных пептидов (Devanthi & Gkatzionis, 2019; Tasdemir & Sanlier, 2020), но исследований, подтверждающих эти эффекты на биологических моделях, не обнаружено, и сами авторы признают дефицит данных.
Это расхождение не является следствием недобросовестности: оно воспроизводит закономерность академической коммуникации, при которой обзоры обобщают и экстраполируют, а оригинальные работы фиксируют конкретные, часто ограниченные результаты. Проблема возникает там, где читатель не различает эти жанры и принимает обсуждаемый потенциал за доказанный факт.

Факторы, объясняющие выявленный разрыв

Сохранение разрыва между лабораторными данными и промышленной применимостью объясняют по меньшей мере три обстоятельства. Первое представляет собой результат публикационного смещения: отрицательные результаты публикуются реже, исследователь с меньшей вероятностью направляет в журнал данные, не подтверждающие эффективность метода, и рецензируемая литература систематически репрезентует положительные исходы. Это общая черта научной коммуникации, и при интерпретации обзорных данных ее необходимо учитывать. Второе — асимметрия требо-

ваний к доказательствам: для публикации достаточно показать, что метод работает в контролируемых условиях, тогда как для внедрения нужно доказать его работоспособность в реальном производстве, безопасность, экономическую целесообразность и масштабируемость (Heux et al., 2015; Pokataiev et al., 2023; Yuan et al., 2022). Третье — испытания безопасности новых штаммов, культивируемых клеток и нетрадиционного сырья дороги и длительны, а их результаты чаще освещают в отчетах для регуляторов и патентах, чем в рецензируемых журналах (Kumar et al., 2021; Зайцева и др., 2023); поскольку настоящий обзор ограничен рецензируемой литературой, часть таких данных могла остаться вне поля зрения.

Ограничения

Полученные выводы необходимо интерпретировать с учетом ряда ограничений. Поиск источников не охватывал патентные базы, диссертации, технические отчеты и неопубликованные клинические испытания, в которых могут содержаться данные о безопасности и масштабировании. Отсюда, заключение об их дефиците относится только к открытой рецензируемой литературе. Формальная оценка качества по стандартизованным шкалам (GRADE, QUADAS) не проводилась ввиду гетерогенности дизайнов и исходов, а классификация утверждений по степени обоснованности носила экспертный характер. Отбор и анализ выполнены одним исследователем, что исключает оценку межэкспертной надежности. Наконец, в обзор включены только публикации на русском и английском языках, а «серая» литература сознательно исключена, что могло привести к недоучету отрицательных результатов.

Практическая значимость

Для планирования будущих исследований из проведенного анализа вытекает несколько следствий. Если конечной целью является промышленное внедрение, работу целесообразно планировать с учётом последующего масштабирования, уже на ранней стадии фиксируя значимые для пилотных испытаний параметры, такие как выход целевого продукта, стабильность процесса, экономические показатели. Данные о безопасности не должны оставаться в разделе «перспективы»: включе-

ние токсикологических, микробиологических и аллергологических испытаний в публикацию разумно считать обязательным, а не факультативным. Наконец, публикация отрицательных результатов заслуживает не меньшего внимания, чем положительных, пока эта практика не станет распространенной, представление об эффективности методов будет оставаться завышенным.

Для решений о внедрении проведенный анализ дает основание различать перспективность направления и его готовность к производству: подтвержденная лабораторными работами перспективность не эквивалентна промышленной зрелости. Наиболее уязвимы решения в трех точках, это переход от лабораторных данных к пилотным испытаниям, отсутствие систематических исследований безопасности и неподтвержденная биодоступность фортифицированных продуктов. Именно они требуют повышенного внимания при оценке инвестиционных проектов. Регуляторным органам можно рекомендовать более четкую дифференциацию требований к лабораторному прототипу, пилотной партии и промышленному образцу с явной фиксацией этих различий в нормативных документах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная систематизация позволяет зафиксировать, что карта исследований в сфере пищевой биотехнологии, какой она предстает в оригинальных исследованиях, заметно сдержаннее оптимистичного тона обзорной литературы. Из четырех рассмотренных направлений лишь биокаталитическая переработка зернового сырья прошла путь от лаборатории до производства. Остальные три накопили обширный лабораторный материал, но несопоставимый по объему массив данных о безопасности, биодоступности и клинической эффективности.

Итог анализа указывает, что в исследованиях необходимо стремиться не к умножению новых объектов, а к строгой проверке уже заявленных, то есть не к масштабированию, а к систематической оценке безопасности и публикации в том числе отрицательных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- Аксенова, Л.М., & Римарева, Л.В. (2017). Направленная конверсия белковых модулей пищевых продуктов животного и растительного происхождения. *Вестник Российской академии наук*, 87(4), 355–357.
- Амелякина, М.В., Иванов, В.В., & Шариков, А.Ю. (2020). Влияние факторов дозировки глюкоамилазы и времени гидролиза на декстрозный эквивалент высококонцентрированных глюкозных сиропов экструдированного крахмала. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*, 8(4), 22–29. <https://doi.org/10.14529/food200403>
- Волкова, Г.С., Соколова, Е.Н., Ионов, В.В., Толокнова, А.А., & Серба, Е.М. (2023). Обоснование выбора комплекса ферментов для биокаталитической обработки жмыха рябины черноплодной. *Пищевая промышленность*, (5), 23–25. <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.5.5.006>
- Гришин, Д.В., Подобед, О.В., Гладиллина, Ю.А., Покровская, М.В., Александрова, С.С., Покровский, В.С., & Соколов, Н.Н. (2017). Биоактивные белки и пептиды: современное состояние и новые тенденции практического применения в пищевой промышленности и кормопроизводстве. *Вопросы питания*, 86(3), 19–31.
- Громов, Д.А., Борисова, А.В., & Бахарев, В.В. (2021). Пищевые аллергены и способы получения гипоаллергенных пищевых продуктов. *Техника и технология пищевых производств*, (2), 232–247. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-232-247>
- Зайцева, Н.В., Зеленкин, С.Е., Шур, П.З., & Суворов, Д.В. (2023). Идентификация потенциальных опасностей и анализ критических контрольных точек производства культивируемого мяса (мяса in vitro). *Вопросы питания*, 92(6), 45–53. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-6-45-53>
- Ильина, Н.И. (2022). Аллергия в России сегодня: проблемы и решения. *Российский аллергологический журнал*, 19(3), 285–288. <https://doi.org/10.36691/RJA1566>
- Карлова, Н.А., Паюрова, Е.Н., & Галактионова, Е.А. (2023). Оценка потерь продовольствия на этапе сельскохозяйственного производства в Российской Федерации. *Вопросы экономики*, (5), 91–105. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2023-5-91-105>
- Касумова, А.А. (2024). Получение биологически активных добавок из вторичного сырья винодельческой промышленности. *Химия растительного сырья*, (2), 385–393. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240213470>
- Ковальчук, М.В., Нарайкин, О.С., & Яцисина, Е.Б. (2019). Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы. *Вестник Российской академии наук*, 89(5), 455–465.
- Красноштанова, А.А., & Шульц, Л.В. (2022). Получение и оценка функциональных свойств белковых изолятов и гидролизатов из растительного сырья. *Химия растительного сырья*, (4), 299–309. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220410952>
- Кручинин, А.Г., & Агаркова, Е.Ю. (2020). Биологически активные пептиды молока: обзор. *Пищевая промышленность*, (12), 92–96. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10151>
- Курбатова, Е.И., Соколова, Е.Н., Борщева, Ю.А., Давыдкина, В.Е., Римарева, Л.В., Поляков, В.А., & Погоржельская, Н.С. (2017). Микромицет *Aspergillus foetidus* — продуцент комплекса гидролитических ферментов. *Микология и фитопатология*, (1), 34–40.
- Ладнова, О.Л., Корячкина, С.Я., Корячкин, В.П., & Большакова, Л.С. (2023). Разработка технологии функциональных хлебобулочных изделий. *Техника и технология пищевых производств*, 53(3), 576–590. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2458>
- Ленчук, Е.Б. (2021). Россия в мировом процессе научно-технологического развития. *Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право*, 14(4), 72–91. <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2021-14-4-5>
- Мезенова, О.Я. (2023). Современная пищевая биотехнология: основные проблемы и вызовы. *Вестник Международной академии холода*, (1), 35–46. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2023-22-1-35-46>
- Мезенова, О.Я., Тишлер, Д., Агафонова, С.В., Мезенова, Н.Ю., Волков, В.В., Бараненко, Д.А., Гримм, Т., & Ридель, С. (2021). Исследование и рациональное применение пептидных и липидных композиций, получаемых при гидролизной переработке коллагенсодержащих тканей. *Вестник Международной академии холода*, (1), 46–58. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-1-46-58>

- Меренкова, С.П., & Резанова, М.А. (2022). Технологические аспекты получения ферментированных напитков антиоксидантной направленности на основе зернового сырья. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*, 10(1), 76–85. <https://doi.org/10.14529/food220109>
- Меренкова, С.П., & Петрушенко, П.С. (2025). Анализ биотехнологических процессов при созревании ржаных заквасок на основе пробиотических микроорганизмов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*, 13(2), 103–111. <https://doi.org/10.14529/food250211>
- Милентьева, И.С., Давыденко, Н.И., & Расщепкин, А.Н. (2020). Подбор рабочих параметров для проведения направленного протеолиза казеина с целью получения биопептидов. *Техника и технология пищевых производств*, 50(4), 726–735. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-726-735>
- Мирзаев, Д.Д., & Эргашев, А.М. (2023). Использование пищевых технологий для разработки альтернативных источников белка. *Universum: технические науки*, 9(114). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15974>
- Носова, М.В. & Дремучева, Г.Ф. (2023). Влияние мультиэнзимных композиций на качество хлеба при ускоренной технологии. *Пищевая промышленность*, (5), 48–50. <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.5.5.013>
- Носова, М.В., Дремучева, Г.Ф. & Костюченко, М.Н. (2020). Исследование технологических свойств мультиэнзимных композиций на основе отечественных ферментных препаратов в производстве хлебобулочных изделий. *Всё о мясе*, (5S), 242–245. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-242-245>
- Плотникова, Е.Ю., & Захарова, Ю.В. (2025). Пробиотики в современной медицинской практике: от мифов к научным доказательствам. *Медицинский совет*, 19(11), 197–204. <https://doi.org/10.21518/ms2025-278>
- Пожидаева, Е.А., Дымовских, Я.А., & Гребенникова, М.С. (2023). Разработка пробиотических пищевых комплексов с повышенным синтезом экзополисахаридов. *Пищевая промышленность*, (5), 13–15. <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.5.5.003>
- Попова, Е.А., Шестакова, А.А., Суркова, Д.Е., & Осмоловский, А.А. (2024). Анализ профиля секретируемых протеолитических ферментов микромицета *Aspergillus ochraceus* ВКМ F-4104D. *Биотехнология*, 40(2), 52–61. <https://doi.org/10.56304/S023427582402008X>
- Ревакина, В.А., Серба, Е.М., Кувшинова, Е.Д., Ларькова, И.А., Римарева, Л.В., Юраскина, Т.А., & Мухортых, В.А. (2022). Влияние ферментолизата непатогенных (пивных) дрожжей (Протамин К) на показатели физического развития массы тела и роста больных пищевой аллергией. *Российский вестник перинатологии и педиатрии*, 67(4), 220. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49438527>
- Римарева, Л.В., Серба, Е.М., Соколова, Е.Н., Борщева, Ю.А., & Игнатова, Н.И. (2017). Ферментные препараты и биокаталитические процессы в пищевой промышленности. *Вопросы питания*, 86(5), 63–74.
- Римарева, Л.В., Серба, Е.М., Оверченко, М.Б., Игнатова, Н.И., Кривова, А.Ю., Курбатова, Е.И., & Соколова, Е.Н. (2018). Многоцелевое использование гриба *Aspergillus oryzae* — продуцента комплекса гидролаз для пищевой промышленности. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*, (5), 29–33.
- Римарева, Л.В., Серба, Е.М., Оверченко, М.Б., Таджикова, П.Ю., Серба, Е.В., Кривова, А.Ю., Калинина, А.Г., & Зорин, С.Н. (2019). Научно-экспериментальное обоснование безопасности биотехнологической продукции для пищевой промышленности. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*, (1), 40–43. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/1/40-43>
- Римарева, Л.В., Оверченко, М.Б., Игнатова, Н.И., Таджикова, П.Ю., & Серба, Е.М. (2020). Некоторые аспекты методологии контроля безопасности, качества и подлинности ферментных препаратов для пищевой промышленности. *Пищевая промышленность*, (4), 48–55. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10044>
- Римарева, Л.В., Оверченко, М.Б., Серба, Е.М., Игнатова, Н.И., & Шелехова, Н.В. (2021a). Конверсия полимеров зерна пшеницы и кукурузы под влиянием фитолитических и протеолитических ферментов. *Сельскохозяйственная биология*, 56(2), 374–383. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.2.374rus>
- Римарева, Л.В., Серба, Е.М., Оверченко, М.Б., Игнатова, Н.И., Погоржельская, Н.С., & Кривова, А.Ю. (2021b). Роль ферментативного катализа в производстве спирта. *Пищевая промышленность*, (9), 50–52. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.9.9.021>
- Римарева, Л.В., Крючкова, Е.Р., Серба, Е.М., Игнатова, Н.И., Погоржельская, Н.С., & Оверченко, М.Б. (2024). Биотехнологические аспекты переработки нетрадиционного зернового сырья для производства спиртных напитков. *Пищевая промышленность*, (4), 53–59. <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.4.4.010>

- Рудакова, Л.В., & Рудаков, О.Б. (2022). Перспективы применения биологически активных добавок из съедобных насекомых в России. *Прикладные информационные аспекты медицины*, 25(3), 78–83. <https://doi.org/10.18499/2070-9277-2022-25-3-78-83>
- Сарсадских, А.В., & Эйриян, Н.А. (2025). Перспективы развития глобального рынка биотехнологий: технологические инновации и региональные тренды. *Фундаментальные исследования*, (3), 84–88. <https://doi.org/10.17513/fr.43800>
- Серба, Е.М., Римарева, Л.В., Курбатова, Е.И., Волкова, Г.С., Поляков, В.А., & Варламов, В.П. (2017). Исследование процесса ферментативного гидролиза биомассы дрожжей для создания пищевых ингредиентов с заданным фракционным составом. *Вопросы питания*, 86(2), 76–84.
- Серба, Е.М. (2018). Актуальные направления пищевой биотехнологии для повышения качества и хранимостоспособности продуктов питания. *Пищевая промышленность*, (6), 8–18.
- Серба, Е.М., Оверченко, М.Б., Римарева, Л.В., Фролова, М.А., Албулов, А.И., Гринь, С.А., & Серба, Е.В. (2019a). Биологически активные добавки для животных на основе конверсии вторичных биоресурсов микробного происхождения. *Ветеринария и кормление*, (5), 22–24. <https://doi.org/10.30917/АТТ-VK-1814-9588-2019-5-7>
- Серба, Е.М., Оверченко, М.Б., Игнатова, Н.И., Таджикова, П.Ю., & Римарева, Л.В. (2019b). К вопросу о контроле качества ферментных препаратов для пищевой промышленности. *Пищевая промышленность*, (4), 87–88. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10044>
- Серба, Е.М., Римарева, Л.В., Оверченко, М.Б., Игнатова, Н.И., Шелехова, Н.В., Погоржельская, Н.С., & Абрамова, И.М. (2020a). Биотехнологические аспекты получения функциональных ингредиентов на основе конверсии биомассы *Saccharomyces cerevisiae* 985-T. *Биотехнология*, 36(4), 54–61. <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-4-34-41>
- Серба, Е.М., Соколова, Е.Н., Римарева, Л.В., Фурсова, Н.А., Волкова, Г.С., Курбатова, Е.И., Юраскина, Т.В., & Абрамова, И.М. (2020b). Перспективные расы хлебопекарных дрожжей для получения пищевых ингредиентов, обогащенных селеном и хромом. *Вопросы питания*, 89(6), 48–57. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10078>
- Серба, Е.М., Таджикова, П.Ю., Римарева, Л.В., Оверченко, М.Б., & Игнатова, Н.И. (2020c). Получение пептидно-аминокислотных ингредиентов на основе грибной биомассы *Aspergillus oryzae*. *Микология и фитопатология*, 54(1), 23–32. <https://doi.org/10.31857/S0026364820010079>
- Серба, Е.М., Таджикова, П.Ю., Игнатова, Н.И., Оверченко, М.Б., Погоржельская, Н.С., & Римарева, Л.В. (2021a). Особенности биоконверсии соевого сырья в ферментированные продукты. *Биотехнология*, 37(5), 41–62. <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2021-37-5-41-62>
- Серба, Е.М., Римарева, Л.В., Оверченко, М.Б., Игнатова, Н.И., Медриш, М.Э., Павлова, А.А., & Соколова, Е.Н. (2021b). Подбор мультиэнзимной композиции и условий подготовки концентрированного зернового сусла. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*, 11(3), 384–392. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-384-392>
- Серба, Е.М., Юраскина, Т.В., Римарева, Л.В., Ревякина, В.А., Медриш, М.Э., & Погоржельская, Н.С. (2022a). Ферментолит *Saccharomyces cerevisiae*: научно-практическое обоснование использования в качестве биологически активной добавки. *Биотехнология*, 38(4), 107–113. <https://doi.org/10.56304/S0234275822040123>
- Серба, Е.М., Римарева, Л.В., Оверченко, М.Б., Игнатова, Н.И., & Погоржельская, Н.С. (2022b). Роль биокатализа в технологиях переработки зернового сырья. *Пищевая промышленность*, (5), 13–15. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.5.5.003>
- Серба, Е.М., Юраскина, Т.В., Римарева, Л.В., Таджикова, П.Ю., Соколова, Е.Н., & Волкова, Г.С. (2023a). Микробная биомасса как биоресурс функциональных пищевых ингредиентов: обзор. *Техника и технология пищевых производств*, 53(3), 426–444. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2446>
- Серба, Е.М., Шариков, А.Ю., Оверченко, М.Б., Римарева, Л.В., Игнатова, Н.И., Серба, В.В., & Машенцева, Н.Г. (2023b). Получение концентрированных ферментных препаратов для конверсии белка и полисахаридов сельскохозяйственного сырья в биотехнологических производствах. *Пищевая промышленность*, (4), 46–50. <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.4.4.008>

- Сидорова, Ю.С., Зорин, С.Н., Петров, Н.А., Фролова, Ю.В., Кочеткова, А.А., & Мазо, В.К. (2019). Сравнительная оценка эффектов белка сои и его ферментолизата на липидный обмен крыс-самцов линии Wistar с индуцированным ожирением. *Вопросы питания*, 88(4), 18–24.
- Синицын, А.П., Синицына, О.А., & Рожкова, А.М. (2022). Получение промышленно важных ферментов на основе экспрессионной системы гриба *Penicillium verruculosum*. *Биотехнология*, 38(2), 14–25. <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-6-24-41>
- Синицын, А.П., Синицына, О.А., Рожкова, А.М., Рубцова, Е.А., Шашков, И.А., Сатрутдинов, А.Д., Цурикова, Н.В., Костылева, Е.В., Середа, А.С., & Великорецкая, И.А. (2023). Возможности промышленного производства ферментов: создание микроорганизмов — продуцентов технических ферментов. *Пищевая промышленность*, (5), 26–30. <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.5.5.007>
- Синицына, О.А., Рубцова, Е.А., Синельников, И.Г., Осипов, Д.О., Рожкова, А.М., Матыс, В.Ю., Бубнова, Т.В., Немашкалов, В.А., Середа, А.С., Щербакова, Л.А., & Синицын, А.П. (2020). Создание продуцента хитиназы и использование её препарата для разрушения клеточной стенки микроскопических грибов. *Биохимия*, 85(6), 840–848. <https://doi.org/10.31857/S0320972520060093>
- Сновская, М.А., Семикина, Е.Л., Макарова, С.Г., Ерешко О.А., Ясаков, Д.С., & Галимова, А.А. (2022). Возрастные особенности сенсибилизации к белку куриного яйца у детей с пищевой аллергией. *Российский аллергологический журнал*, 19(4), 460–471. <https://doi.org/10.36691/RJA1565>
- Соколова, Е.Н., Шариков, А.Ю., Юраскина, Т.В., & Серб, Е.М. (2022). Протеолиз белковых компонентов растительного сырья с высоким аллергенным потенциалом. *Вестник КрасГАУ*, (10), 207–214. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-10-207-214>
- Соколова, Е.Н., Серб, Е.М., Римарева, Л.В., Фурсова, Н.А., & Волкова, Г.С. (2024). Современные микробиологические подходы к получению штамма хлебопекарных дрожжей, перспективного для создания обогащенных пищевых ингредиентов. *Вестник КрасГАУ*, (7), 243–250. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-7-243-250>
- Соколова, Е.Н., Шариков, А.Ю., Фурсова, Н.А., Серб, Е.М., & Волкова, Г.С. (2025a). Биосовместимость микроэлементов для получения обогащенных пищевых ингредиентов. *Вестник КрасГАУ*, (8), 226–238. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-8-226-238>
- Соколова, Е.Н., Шариков, А.Ю., & Серб, Е.М. (2025b). Биотехнологическая модификация сушеного растительного сырья — инновационный способ получения натуральных пищевых ингредиентов. *Аграрно-пищевые инновации*, (2), 61–69. <https://doi.org/10.31208/2618-7353-2025-30-61-69>
- Соколова, О.В., & Федотова, О.Б. (2023). Некоторые аспекты создания ферментированных молочных продуктов сложного сырьевого состава с эмерджентными свойствами. *Пищевая промышленность*, (5), 42–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.5.5.011>
- Соколова, А.П., & Сухарева, О.А. (2024). Инновационные технологии как драйвер развития аграрных предприятий России. *Вестник Академии знаний*, (3), 390–396.
- Стоянова, Л.Г., Дбар, С.Д., & Полянская, И.С. (2022). Метабиотические свойства штаммов *Lactobacillus acidophilus*, входящих в комплексные закваски для производства пробиотических молочных продуктов. *Биотехнология*, 38(1), 3–12. <https://doi.org/10.56304/S0234275822010070>
- Степанов, В.И., Иванов, В.В., Шариков, А.Ю., Поливановская, Д.В., & Хабибулина, Н.В. (2017). Биокатализ экстрадированного крахмала в технологии мальтодекстрина. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*, (4), 8–12.
- Титова, Е.С., Шишкин, С.С. (2023). *Актуальные проблемы биоэкономики, роль постгеномных дисциплин*. Москва: ВАШ ФОРМАТ.
- Тышко, Н.В., Садыкова, Э.О., Шестакова, С.И., & Аксюк, И.Н. (2020). Новые источники пищи: от генно-инженерно модифицированных организмов к расширению биоресурсной базы России. *Вопросы питания*, 89(4), 100–109. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10046>
- Фауст, Е.А. (2015). *Основы биотехнологии: краткий курс лекций*. Саратов: Саратовский ГАУ.

- Филькин, С.Ю., Липкин, А.В., & Федоров, А.Н. (2024). Использование рекомбинантных белков в современной пищевой биотехнологии: обзор предметного поля. *FOOD METAENGINEERING*, 2(2), 48–74. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.2.46>
- Цыбулько, Н.С., & Мясникова, С.Б. (2020). Коллекция клеточных культур как альтернативный источник получения биологически активных веществ. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*, 23(2), 12–17. <https://doi.org/10.29296/25877313-2020-02-02>
- Чернуха, И.М., Машенцева, Н.Г., Вострикова, Н.Л. Ковалев, Л.И., Ковалева, М.А., & Афанасьев, Д.А. (2020). Образование биологически активных пептидов в мясном сырье под влиянием лизатов стартовых бактериальных культур. *Сельскохозяйственная биология*, 55(6), 1182–1203. <https://doi.org/10.15389/AGROBIOLOGY.2020.6.1182RUS>
- Шариков, А. Ю., Соколова, Е. Н., Амелякина, М. В., Юраскина, Т. В., Иванов, В. В., & Серб, Е. М. (2020). Разработка концепции производства снеков из пшеницы с элиминацией глютена биокаталитическим методом. *Вестник ВГУИТ*, 82(4), 77–83. <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-77-83>
- Шариков, А.Ю., Иванов, В.В., Амелякина, М.В., Середа, А.С., & Поливановская, Д.В. (2021). Биокатализ крахмала кукурузы термостабильной α -амилазой в двухшнековом экструдере. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 64–75. <http://doi.org/10.36107/spfp.2021.244>
- Шариков, А.Ю., Соколова, Е.Н., Волкова, Г.С., Куксова, Е.В., Амелякина, М.В., & Иванов, В.В. (2022). Процессы биокатализа и термопластической экструзии в технологии готовых к употреблению продуктов с использованием жмыхов плодово-ягодного сырья. *Биотехнология*, 38(4), 67–71. <https://doi.org/10.56304/S0234275822040135>
- Шишкина, Д.И., Штовхун, А.И., Клейн, Е.Э., & Беркетова, Л.В. (2022). Современные технологии производства альтернативного молока из растительных продуктов. *Вестник ВГУИТ*, 84(4), 141–148. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-4-141-148>
- Юраскина, Т.В., Соколова, Е.Н., Фурсова, Н.А., Андреева, С.С., & Серб, Е.М. (2021). Инновационные биотехнологические подходы при получении пищевых ингредиентов на основе обогащенных микроорганизмов. *Пищевая промышленность*, (9), 64–66. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.9.9.029>
- Юраскина, Т.В., Соколова, Е.Н., Фурсова, Н.А., & Серб, Е.М. (2023). Инновационный подход к обогащению пищевых продуктов с применением хлебопекарных дрожжей. *Пищевые системы*, 6(4), 554–560. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-4-554-560>
- Ayele, A., Haile, S.T., Alemu, D., & Kamaraj, M. (2021). Comparative utilization of dead and live fungal biomass for the removal of heavy metal: A concise review. *The Scientific World Journal*, (1), 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/5588111>
- Bazzaz, S., Abbasi, A., Ghotbabad, A.G., Pourjafar, H., & Hosseini, H. (2025). Novel encapsulation approaches in the functional food industry: With a focus on probiotic cells and bioactive compounds. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 17(3), 1132–1170. <https://doi.org/10.1007/s12602-024-10364-7>
- Bulakhov, A.G., Volkov, P.V., Rozhkova, A.M., Gusakov, A.V., Nemashkalov, V.A., Satrutdinov, A.D., & Sinitsyn, A.P. (2017). Using an inducible promoter of a gene encoding *Penicillium verruculosum* glucoamylase for production of enzyme preparations with enhanced cellulase performance. *PLoS One*, 12, e0170404. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170404>
- Cao, Z.-H., Green-Johnson, J.M., Buckley, N.D., & Lin, Q.-Y. (2019). Bioactivity of soy-based fermented foods: A review. *Biotechnology Advances*, 37(1), 223–238. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.12.001>
- Dean, S.N., Rimmer, M.A., Turner, K.B., & Phillips, D.A. (2020). *Lactobacillus acidophilus* membrane vesicles as a vehicle of bacteriocin delivery. *Frontiers in Microbiology*, 11, 710. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00710>
- Devanthi, P.V.P., & Gkatzionis, K. (2019). Soy sauce fermentation: Microorganisms, aroma formation, and process modification. *Food Research International*, 120, 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.02.010>
- Cagno, R.Di, Angelis, M.De, Lavermicocca, P., & Vincenzi, M. De (2002). Proteolysis by sourdough lactic acid bacteria: effects on wheat flour protein fractions and gliadin peptides involved in human cereal intolerance. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(2), 623–633. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.2.623-633.2002>

- Dobermann, D., Swift, J.A., & Field, L.M. (2017). Opportunities and hurdles of edible insects for food and feed. *Nutrition Bulletin*, 42(4), 293–308. <https://doi.org/10.1111/nbu.12291>
- Dubey, P., Thakur, V., & Chattopadhyay, M. (2020). Role of minerals and trace elements in diabetes and insulin resistance. *Nutrients*, 12(6), 1864. <https://doi.org/10.3390/nu12061864>
- Fernandes, R.A., Regateiro, F., Pereira, C., & Faria E. (2018). Anaphylaxis in a food allergy outpatient department: One-year review. *European Annals of Allergy and Clinical Immunology*, 50(2), 81–88. <https://doi.org/10.23822/EurAnnACI.1764-1489.45>
- Gautam, I., Yarava, J.R., Xu, Y., Li, R., Scott, F.J., Mentink-Vigier, F., Momany, M., Latgé, J.-P., & Wang, T. (2025). Comparative analysis of polysaccharide and cell wall structure in *Aspergillus nidulans* and *Aspergillus fumigatus* by solid-state NMR. *Carbohydrate Polymers*, 348(A), 122907. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122907>
- Gründling, A. (2021). Modifications of cell wall polymers in Grampositive bacteria by glycosylation. *Current Opinion in Microbiology*, 60, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2021.01.007>
- Halavach, T.M., Dudchik, N.V., Tarun, E.I., Zhygankov, V.G., Kurchenko, V.P., Romanovich, R.V., Khartitonov, V.D., & Asafov, V.A. (2020). Biologically active properties of hydrolysed and fermented milk proteins. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 9(4), 714–720. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.9.4.714-720>
- Halavach, T.M., Savchuk, E.S., Bobovich, A.S., Dudchik, N.V., Tsygankow, V.G., Tarun, E.I., Yantsevich, A.V., Kurchenko, V.P., Kharitonov, V.D., & Asafov, V.A. (2021). Antimutagenic and antibacterial activity of β -cyclodextrin clathrates with extensive hydrolysates of colostrum and whey. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(2), 8626–8638. <https://doi.org/10.33263/BRIAC112.86268638>
- Hettinga, K., & Bijl, E. (2022). Can recombinant milk proteins replace those produced by animals? *Current Opinion in Biotechnology*, 75, 102690. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102690>
- Heux, S., Meynial-Salles, I., O'Donohue, M.J., & Dumon, C. (2015). White biotechnology: State of the art strategies for the development of biocatalysts for biorefining. *Biotechnology Advances*, 33, 1653–1670. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.08.004>
- Jeske, S., Zannini, E., & Arendt, E.K. (2022). Fermentation of plant-based proteins with *Aspergillus* species: Impact on nutritional and sensory properties. *Trends in Food Science & Technology*, 121, 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.018>
- Jordá, T., & Puig, S. (2020). Regulation of ergosterol biosynthesis in *Saccharomyces cerevisiae*. *Genes*, 11(7), 795. <https://doi.org/10.3390/genes11070795>
- Kalebina, T.S., & Rekstina, V.V. (2019). Molecular organization of yeast cell envelope. *Molecular Biology*, 53(6), 850–861. <https://doi.org/10.1134/S0026893319060062>
- Kawaguchi, H., Takada, K., Elkasaby, T., Pangestu, R., Toyoshima, M., Kahar, P., Ogino, C., Kaneko, T., & Kondo, A. (2022). Recent advances in lignocellulosic biomass white biotechnology for bioplastics. *Bioresource Technology*, 344(B), 126165. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126165>
- Kępińska-Pacelik, J., & Biel, W. (2022). Insects in pet food industry — Hope or threat? *Animals*, 12(12), 1515. <https://doi.org/10.3390/ani12121515>
- Kluge, J., Terfehr, D., & Kück, U. (2018). Inducible promoters and functional genomic approaches for genetic engineering of filamentous fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, 6357–6372. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9115-1>
- Krausova, G., Kana, A., Vecka, M., Hyrslova, I., Stankova, B., Kantorova, V., Mrvikova, I., Huttli, M., & Malinska, H. (2021). In vivo bioavailability of selenium in selenium-enriched *Streptococcus thermophilus* and *Enterococcus faecium* in CD IGS rats. *Antioxidants*, 10(3), 463. <https://doi.org/10.3390/antiox10030463>
- Kreis, W. (2019). Exploiting plant cell culture for natural product formation. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 92, 216–225. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2019.092.030>
- Król, B., Słupczyńska, M., Kinal, S., Bodarski, R., Tronina, W., & Mońka, M. (2017). Bioavailability of organic and inorganic sources of chromium in broiler chicken feeds. *Journal of Elementology*, 22(1), 283–294. <https://doi.org/10.5601/jelem.2016.21.1.1119>
- Kumar, P., Sharma, N., Sharma, S., Mehta, N., Verma, A.K., Chemmalar, S., & Sazili, A.Q. (2021). In-vitro meat: A promising solution for sustainability of meat sector. *Journal of Animal Science and Technology*, 63(4), 693–724. <https://doi.org/10.5187/jast.2021.e85>

- Kumar, S.B., Arnipalli, S.R., Mehta, P., Carrau, S., & Ziouzenkova, O. (2022). Iron deficiency anemia: Efficacy and limitations of nutritional and comprehensive mitigation strategies. *Nutrients*, 14(14), 2976. <https://doi.org/10.3390/nu14142976>
- Latgé, J.P., Henry, T., Aïmanianda, V., Beauvais, A., Chou, S.F., Hansen, S.W., Fontaine, T., Mäkelä, M., Delaunay, A., d'Enfert, C., & Parrou, J.L. (2023). Cell wall of *Aspergillus fumigatus*: Variability and response to stress. *Journal of Fungi*, 9(10), 1023. <https://doi.org/10.3390/jof9101023>
- Nielsen, J., Tillegreen, C.B., & Petranovic, D. (2022). Innovation trends in industrial biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 40, 1160–1172. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.03.007>
- Nielsen, M.B., Meyer, S., & Arnau, J. (2024). The next food revolution is here: Recombinant microbial production of milk and egg proteins by precision fermentation. *Annual Review of Food Science and Technology*, 15, 173–187. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023-034256>
- Pinotti, L., Giromini, C., Ottoboni, M., Tretola, M., & Marchis, D. (2019). Review: Insects and former foodstuffs for upgrading food waste biomasses/streams to feed ingredients for farm animals. *Animal*, 13(7), 1365–1375. <https://doi.org/10.1017/S1751731118003622>
- Plaza-Díaz, J., Ruiz-Ojeda, F.J., Gil-Campos, M., & Gil, A. (2019). Mechanisms of action of probiotics. *Advances in Nutrition*, 10(1), 49–66. <https://doi.org/10.1093/advances/nmy063>
- Pokataiev, P., Liezina, A., Petukhova, H., & Andriushchenko, A. (2023). The role of biotechnology in the development of the bioeconomy. *Acta Innovations*, (46), 18–33. <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.46.2>
- Polyakov, V.A., Serba, E.M., Overchenko, M.B., Ignatova, N.I., & Rimareva, L.V. (2019). Effects of a complex phytase-containing enzyme preparation on the rye fermentation process. *Foods and Raw Materials*, 7(2), 221–228. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-221-228>
- Popova, E., Titova, M., Tynykulov, M., Zakirova, R., Kulichenko, I., Prudnikova, O., & Nosov, A. (2023). Sustainable production of Ajuga bioactive metabolites using cell culture technologies: A review. *Nutrients*, 15(5), 1246. <https://doi.org/10.3390/nu15051246>
- Prikhodko, D.V., & Krasnoshtanova, A.A. (2023). Using casein and gluten protein fractions to obtain functional ingredients. *Foods and Raw Materials*, 11(2), 223–231. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-2-569>
- Rimareva, L.V., Sokolova, E.N., Serba, E.M., Borshchev, Y.A., Kurbatova, E.I., & Krivova, A.Y. (2017). Reduced allergenicity of foods of plant nature by the method of enzymatic hydrolysis. *Oriental Journal of Chemistry*, 33(4), 2009–2015. <https://doi.org/10.13005/ojc/330452>
- Rimareva, L.V., Serba, E.M., Overchenko, M.B., Shelekhova, N.V., Ignatova, N.I., & Pavlova, A.A. (2022). Enzyme complexes for activating yeast generation and ethanol fermentation. *Foods and Raw Materials*, 10(1), 127–136. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-1-127-136>
- Ryazantseva, K.A., Agarkova, E.Yu., & Fedotova, O.B. (2021). Continuous hydrolysis of milk proteins in membrane reactors of various configurations. *Foods and Raw Materials*, 9(2), 271–281. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-271-281>
- Serba, E.M., Pimenov, N.V., Mochalina, P.Yu., Overchenko, M.B., Borscheva, Yu.A., Sharikov, A.Yu., & Rimareva, L.V. (2020a). Production of *Aspergillus oryzae* RCAM 01133 biomass with increased protein and polysaccharides content using by-products of food industry. *Agronomy Research*, 18(1), 290–300. <https://doi.org/10.15159/ar.20.026>
- Serba, E.M., Rimareva, L.V., Overchenko, M.B., Ignatova, N.I., Tadzhibova, P.Yu., & Zorin, S.N. (2020b). Production of peptides and amino acids from microbial biomass in food and feed industries: biotechnological aspects. *Foods and Raw Materials*, 8(2), 268–276. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-268-276>
- Serba, E.M., Tadzhibova, P.Yu., Rimareva, L.V., & Overchenko, M.B. (2021a). Bioconversion of soy under the influence of *Aspergillus oryzae* strains producing hydrolytic enzymes. *Foods and Raw Materials*, 9(1), 52–58. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-52-58>
- Serba, E.M., Rimareva, L.V., Yuraskina, T.V., Sokolova, E.N., & Revyakina, V.A. (2021b). Biomedical and biotechnological aspects of the production of functional ingredients based on yeast biomass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 848, 012208. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012208>
- Shah, A.A., Totakul, P., Matra, M., Cherdthong, A., Hanboonsong, Y., & Wanapat, M. (2022). Nutritional composition of various insects and potential uses as alternative protein sources in animal diets. *Animal Bioscience*, 35(2), 317–331. <https://doi.org/10.5713/ab.21.0447>

- Tasdemir, S. S., & Sanlier, N. (2020). An insight into the anticancer effects of fermented foods: A review. *Journal of Functional Foods*, 75, 104281. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104281>
- Treich, N. (2021). Cultured meat: promises and challenges. *Environmental and Resource Economics*, 79(1), 33–61. <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00551-3>
- Wilson, B.L., Pieterse, E., Sigge, G., & Hoffman, L.C. (2020). Insects as human food; from farm to fork. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5017–5022. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8860>
- Yuan, J.S., Pavlovich, M.J., Ragauskas, A.J., & Han, B. (2022). Biotechnology for a sustainable future: biomass and beyond. *Trends in Biotechnology*, 40(12), 1395–1398. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.09.020>
- Zhang, Z.-H., Wu, Q.-Y., Chen, C., Zheng, R., Chen, Y., Ni, J.-Z., & Song, G.-L. (2018). Comparison of the effects of selenomethionine and selenium-enriched yeast in the tripletransgenic mouse model of Alzheimer's disease. *Food and Function*, 9(7), 3965–3973. <https://doi.org/10.1039/C7FO02063E>

ОБ АВТОРЕ

Серб Елена Михайловна, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора Всероссийского Научно-Исследовательского Института Пищевой Биотехнологии — филиал Федерального Государственного Бюджетного Учреждения Науки «Федеральный Исследовательский Центр питания, биотехнологии и безопасности пищи» (ВНИИПБТ — филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»), (111033, Российская Федерация, г. Москва, ул. Самокатная, д. 4-Б), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1660-2634>, Scopus ID: 6508377541, Researcher ID: AAW-2866-2020, SPIN-код: 1887-3498, serbae@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Serba Elena Mikhailovna, Dr. Sci. (Biology), Docent, Corresponding Member of the RAS, Deputy Director for Research VNIIPBT is a branch of the Federal Research Centre of Nutrition and Biotechnology (111033, Russian Federation, Moscow, Samokatnaya street, 4B), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1660-2634>, Scopus ID: 6508377541, Researcher ID: AAW-2866-2020, SPIN-code: 1887-3498, serbae@mail.ru

Жировая фаза пищевых систем: критический обзор влияния состава и соотношения животных и растительных жиров на липидный обмен и кардиометаболические показатели

Е.А. Лаптева

Российский биотехнологический университет, г. Москва,
Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Животные жиры и растительные масла нередко противопоставляются как однозначно неблагоприятные и однозначно благоприятные компоненты питания. Эта схема стала предметом новой полемики после публикации комментария, предложившего пересмотреть роль свиного сала в регуляции гомеостаза глюкозы.

Цель: Критически оценить современные данные о сале, других животных жирах и растительных маслах в связи с диабетом 2 типа, липидными нарушениями, артериальной гипертензией, за, сердечно-сосудистыми событиями, заболеваниями печени и смертностью.

Методы: Выполнен критический обзор с систематизированным поиском в PubMed/MEDLINE и проверкой списков литературы публикаций, вышедших с 1 января 2021 года по 4 июня 2026 года. Приоритет отдавался рандомизированным контролируемым испытаниям, проспективным когортам, систематическим обзорам и метаанализам. Исследования на животных анализировались отдельно как источники гипотез.

Результаты: Прямые данные о сале у человека ограничены двумя 12-недельными контролируемыми исследованиями у здоровых взрослых, сравнившими сало, соевое масло и их смесь. Смесь, но не чистое сало, сопровождалась более выраженным снижением артериального давления или активности аминотрансфераз; различий по глюкозе и липидам между чистым салом и соевым маслом не выявлено. Следовательно, эти работы не подтверждают ни антидиабетическое, ни кардиопротективное действие сала. Исследования на животных дают разнонаправленные результаты, которые зависят от модели заболевания, доли жира в рационе и масла сравнения. Для растительных масел наиболее последовательные данные относятся к замене части насыщенных жирных кислот ненасыщенными, а не к растительному происхождению масла как таковому.

Выводы: Доказательства не поддерживают простую дихотомию «сало против растительного масла». Значение имеют конкретный жирнокислотный профиль, изокалорийное замещение, кулинарное применение и общий пищевой паттерн.

Ключевые слова: свиное сало; животные жиры; растительные масла; линолевая кислота; насыщенные жирные кислоты; диабет 2 типа; кардиометаболический риск

Корреспонденция:

Елена Александровна Лаптева
E-mail: Laptevaea@mgupp.ru

Конфликт интересов:

автор сообщает
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 10.02.2026

Принята: 15.06.2026

Опубликована: 30.06.2026

Copyright: © 2026 Автор



Для цитирования: Лаптева, Е.А. (2026). Жировая фаза пищевых систем: критический обзор влияния состава и соотношения животных и растительных жиров на липидный обмен и кардиометаболические показатели. *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 62–75. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.119>

The Fat Phase of Food Systems: A Critical Review of the Effects of the Composition and Ratio of Animal and Vegetable Fats on Lipid Metabolism and Cardiometabolic Markers

Elena A. Lapteva

Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher
Education Russian Biotechnological
University, Moscow,
Russian Federation

ABSTRACT

Background: Animal fats and vegetable oils are often framed as uniformly harmful and uniformly beneficial, respectively. This dichotomy has been challenged by a recent commentary advocating a reassessment of lard in glucose homeostasis.

Purpose: To critically appraise current evidence on lard, other animal fats, and vegetable oils in relation to type 2 diabetes, lipid disorders, blood pressure, liver disease, cardiovascular events, and mortality.

Materials and Methods: A critical review with a structured PubMed/MEDLINE search and reference-list checking covered publications from 1 January 2021 to 4 July 2026. Randomized controlled trials, prospective cohorts, systematic reviews, and meta-analyses were prioritized. Animal studies were analysed separately as hypothesis-generating evidence.

Results: Direct human evidence on lard is limited to two 12-week controlled feeding trials in healthy adults comparing lard, soybean oil, and a 1:1 blend. The blend, but not pure lard, was associated with larger decreases in blood pressure or aminotransferase activity; no between-group differences were observed for glucose or blood lipids. These studies do not establish antidiabetic or cardioprotective effects of lard. Animal experiments are directionally inconsistent and depend on the model, dietary fat percentage, and comparator oil. For vegetable oils, the most consistent evidence concerns replacement of saturated fats with unsaturated fats rather than plant origin per se.

Conclusion: The relevant analytical unit is the isocaloric replacement model, the specific fatty-acid profile, culinary use, and the overall dietary pattern.

Keywords: lard; animal fats; vegetable oils; linoleic acid; saturated fatty acids; type 2 diabetes; cardiometabolic risk

Correspondence:

Elena A. Lapteva

E-mail: Laptevaea@mgupp.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 10.02.2026

Accepted: 15.06.2026

Published: 30.06.2026

Copyright: © 2026 The Author



To cite: Lapteva, E.A. (2026). The fat phase of food systems: A critical review of the effects of the composition and ratio of animal and vegetable fats on lipid metabolism and cardiometabolic markers. *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 62–75. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.119>

ВВЕДЕНИЕ

Пищевые жиры остаются одним из наиболее поляризованных объектов диетологической дискуссии. В популистской логике животный жир часто становится синонимом метаболической опасности. Растительное масло, напротив, зачастую заявляют самостоятельным маркером здорового питания. Подобное противопоставление удобно в коммуникации, но аналитически неполно: как животные жиры, так и растительные масла представляют неоднородные смеси жирных кислот и сопутствующих пищевых компонентов, а их возможный эффект зависит от продукта сравнения, общей энергетической ценности рациона и способа применения в пище. Отсюда, обоснованная оценка пищевых жиров должна исходить не из происхождения продукта, а из конкретной модели замещения одного компонента питания другим (Rosqvist & Niinistö, 2024; World Health Organization, 2023).

Интенсивность полемики усилилась после публикации Guo et al. (2024), в которой авторы предложили пересмотреть статус свиного сала как неблагоприятного фактора в контексте диабета. Эта публикация важна прежде всего как постановка исследовательского вопроса, однако её жанр определяет пределы интерпретации. Будучи комментарием, а не первичным исследованием, систематическим обзором или метаанализом, она не создаёт самостоятельного причинного доказательства. Гипотеза о возможной недооценке сала опирается главным образом на экологические сопоставления и результаты доклинических моделей. Такие данные могут указывать на направления дальнейшего исследования, но не позволяют установить, связано ли индивидуальное потребление сала с риском диабета 2 типа и, тем более, обладает ли оно профилактическим эффектом.

Это ограничение имеет не только доказательное, но и понятийное значение. Даже более сильное исследование не могло бы корректно ответить на вопрос о пользе или вреде сала, пока не определено, с каким именно жиром, продуктом или пищевым паттерном оно сопоставляется. Сало не является чистым источником насыщенных жирных кислот, так же как растительные масла не образуют единый биологически однородный класс. Рапсовое, оливковое, соевое, подсолнечное, пальмовое и кокосовое масла различаются по соотношению насыщенных, мононенасыщенных

и полиненасыщенных жирных кислот, содержанию минорных компонентов и типичным способам кулинарного использования. Поэтому результаты конкретного сравнения, например рапсового и оливкового масла, нельзя автоматически переносить на все растительные масла или на любой рацион, содержащий эти продукты (Petersen et al., 2024; Voon et al., 2024).

Следовательно, предметом критической оценки должен быть не абстрактный выбор между «животным жиром» и «растительным маслом», а доказательства по строго определённым пищевым заменам, видам жиров и уровням исходов. Необходимо отдельно установить, что известно о непосредственном влиянии сала, что показывают исследования отдельных растительных масел и какие выводы позволяют сделать данные о замене насыщенных жирных кислот ненасыщенными. При этом принципиально важно различать клинические исходы, метаболические показатели и доклинические наблюдения, поскольку изменения биомаркеров или результаты экспериментов на животных не равнозначны доказательству профилактики диабета либо сердечно-сосудистых заболеваний.

Цель настоящего обзора состоит в критической оценке современной доказательной базы в исследованиях о сале, других животных жирах и растительных маслах применительно к кардиометаболическому здоровью. Исследование отвечает на три вопроса:

RQ1. Имеются ли основания считать сало самостоятельным фактором профилактики диабета или сердечно-сосудистых заболеваний?

RQ2. Позволяют ли имеющиеся данные квалифицировать растительные масла как единый полезный класс?

RQ3. Какие выводы обоснованно следуют из исследований, сравнивающих насыщенные и ненасыщенные жиры?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн обзора

Исследование выполнено в дизайне критического обзора с опорой на систематизированный библиографический поиск. Такой дизайн выбран потому, что обсуждаемое поле включает краткосрочные контролируемые рационы, длительные когорты, систематические обзоры, рекомендации общественного здравоохранения

и доклинические эксперименты. Их нельзя корректно объединить в единый количественный эффект без утраты смысла сравнения. Поэтому каждая публикация оценивалась по дизайну, популяции, экспозиции или вмешательству, рациону сравнения, продолжительности, релевантности исходов и ограничениям причинной интерпретации.

Отбор и анализ источников

Поиск проведён в PubMed/MEDLINE 30 мая 2026. Дополнительно анализировались списки литературы включённых в обзор метаанализов, систематических обзоров и рандомизированных исследований, а также официальные публикации Всемирной организации здравоохранения. Поисковые блоки включали сведения о сале и других животных жирах; о растительных маслах; о линолевой кислоте; о замене насыщенных жирных кислот ненасыщенными. Полные поисковые запросы представлены в Приложении 1. Временное окно охватывало публикации с 1 января 2021 года по 1 мая 2026 года.

В основной синтез включались исследования взрослых людей, систематические обзоры, метаанализы, проспективные когорты, рандомизированные контролируемые испытания и доказательные руководства, в которых вид жира или масла был определён достаточно ясно для содержательной интерпретации. Исключались тезисы конференций, статьи о технологических свойствах масел без оценки состояния здоровья респондентов, а также многокомпонентные вмешательства, в которых эффект жира невозможно отделить от эффекта других компонентов. Эксперименты на животных включались только в отдельную часть обзора и не использовались как основание для клинических рекомендаций.

Для каждого включённого в обзор источника извлекалась информация об авторах, дате публикации, стране проведения исследования, дизайне, численности и характеристиках участников, виде и дозе жира, рационе сравнения, длительности наблюдения, результатах, величине эффекта при её наличии и существенных для выводов ограничениях. При интерпретации различались клинические исходы, метаболические показатели и суррогатные маркеры. Эта граница особенно важна, поскольку снижение активности аминотрансферазы или изменение состава микробиоты не доказывает профилактику диабета, неалкогольной жировой болезни печени или сердечно-сосудистой смертности.

Иерархия оцениваемых результатов

Для того чтобы вес доказательства был понятен читателю, результаты были распределены по иерархии клинической значимости. На верхнем уровне расположены новые случаи диабета 2 типа, инфаркт миокарда, инсульт, сердечно-сосудистая и общая смертность. На втором уровне находятся метаболические показатели, которые отражают отдельные звенья риска: гликированный гемоглобин, глюкоза и инсулин натошак, индекс HOMA-IR, LDL-холестерин, non-HDL-холестерин, аполипопротеин В и триглицериды. На третьем уровне находятся суррогатные показатели, включая аланинаминотрансферазу, аспартатаминотрансферазу, массу тела, окружность талии, артериальное давление, маркеры воспаления и характеристики микробиоты (Таблица 1). Такая структура не обесценивает промежуточные результаты, но исключает их подмену клиническими исходами.

Таблица 1
Иерархия результатов и правила интерпретации

Table 1
Result hierarchy and interpretation guidelines

Уровень	Что оценивается	Как интерпретируется
Клинические исходы	Новые случаи диабета 2 типа; инфаркт миокарда; инсульт; сердечно-сосудистая и общая смертность	Имеют наибольший вес для практического вывода. Требуют длительных испытаний или качественных проспективных когорт.
Метаболические показатели	Гликированный гемоглобин; глюкоза и инсулин натошак; HOMA-IR; LDL-холестерин; non-HDL-холестерин; аполипопротеин В; триглицериды	Показывают влияние на отдельные механизмы риска, но не заменяют данные о заболеваемости и смертности.
Суррогатные показатели	АЛТ; АСТ; масса тела; окружность талии; артериальное давление; С-реактивный белок; микробиота	Не позволяют утверждать профилактику диабета, заболеваний печени или сердечно-сосудистых событий без прямых данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сало: различие между гипотезой, биомаркером и клиническим эффектом

Современная гипотеза о «реабилитации» сала пока не имеет прямой клинической опоры. Комментарий Guo et al. (2024) обращает внимание на межпопуляционные различия в распространённости диабета и на эксперименты с жировыми смесями, однако эти источники не дают индивидуального причинного доказательства. Межстрановые сопоставления особенно уязвимы к экологической ошибке: различия в частоте диабета способны отражать структуру потребления рафинированных углеводов, распространённость ожирения, физическую активность, урбанизацию, доступность диагностики и социально-экономические условия. По этой причине наблюдение о том, что популяции с разными кулинарными традициями имеют разную частоту диабета, не устанавливает защитное действие определённого жира и требует проверки в исследованиях индивидуального уровня.

В проанализированных источниках прямые данные респондентов представлены двумя краткосрочными исследованиями одного исследовательского направления. В испытании Liu et al. (2023b) 334 здоровых взрослых были рандомизированы на 12 недель к изокалорийным рационам с 30 г в сутки сала, соевого масла или смеси, состоявшей поровну из сала и соевого масла. Артериальное давление снижалось у респондентов на смешанном рационе. Чистое сало не продемонстрировало преимуществ ни перед соевым маслом, ни по изменениям массы тела, окружности талии, глюкозы или липидов крови. Следовательно, положительный сигнал относится к композиции 50:50, а не к продукту «сало» как самостоятельной интервенции. В параллельном исследовании Liu et al. (2023a) 345 здоровых взрослых получали те же варианты масел и ту же суточную дозу в течение 12 недель. Смешанный рацион сопровождался большим снижением активности аспартатаминотрансферазы и аланинаминотрансферазы, чем каждое масло по отдельности, тогда как по другим показателям функции печени различий между группами не отмечено. Этот результат нельзя интерпретировать как профилактику метаболически ассоциированной жировой болезни печени: у участников не оценивались новые случаи заболевания, содержание жира в печени или фиброз, а аминотранс-

феразы являются неспецифичными лабораторными маркерами. Таким образом, обе работы формируют узкую и биологически интересную гипотезу о смеси жиров, но не дают основания говорить о лечебной или профилактической пользе сала.

Методологическое значение этих испытаний определяется также их продолжительностью и популяцией. Двенадцать недель исследования позволяют оценить краткосрочную динамику биомаркеров, но не позволяют установить влияние на новые случаи диабета 2 типа, инфаркта, инсульта или смертности. Кроме того, результаты получены у здоровых респондентов-взрослых и не могут автоматически переноситься на людей с преддиабетом, ожирением, дислипидемией, диабетом или заболеваниями печени. Этот разрыв между внутренней валидностью контролируемого питания и внешней валидностью для долговременной профилактики особенно важен при переходе к доклиническим исследованиям.

Доклинические исследования

Совокупность доклинических исследований не позволяет сделать однозначный вывод ни о преимущественно неблагоприятном, ни о потенциально благоприятном метаболическом действии сала. В модели низкожирового высокоуглеводного питания у мышей смесь сала и соевого масла в рационе уменьшала выраженность экспериментально индуцированной жировой инфильтрации печени по сравнению с отдельными маслами (Yan et al., 2022). Однако эта работа сравнивает специфическую смесь в конкретной модели заболевания и не показывает, что сало препятствует диабету или заболеваниям печени у человека. Механистический результат в животной модели следует рассматривать как основание для последующего клинического испытания, а не как замену такого испытания.

Направление эффекта изменяется при изменении модели и масла в сравнении. В 16-недельном эксперименте Zhou et al. (2023) на мышах с высокожировыми рационами рапсовое масло показало более благоприятный профиль накопления липидов в печени, чем сало и оливковое масло. В другой модели высокожировое питание на основе сала в течение 66 дней сопровождалось увеличением массы тела, расширением висцеральных жировых депо, нарушением толерантности к глюкозе и ростом общего холестерина и триглице-

ридов (Chu et al., 2024). Эти результаты не доказывают аналогичного эффекта обычного употребления сала людьми, но они опровергают представление о том, что доклиническая литература единообразно поддерживает его метаболическую безопасность.

Исследование Zommara et al. (2025), которое также используется в дискуссии о метаболических эффектах животных жиров, подтверждает неоднородность данной категории, однако не предоставляет прямых данных о сале. В экспериментальной модели на мышах сопоставлялись говяжий, буйволиный и бараний жир, куриный жир и молочный жир; свиное сало в состав исследуемых рационов не включалось. Следовательно, выявленные различия между указанными видами животных жиров не могут быть экстраполированы на сало и не позволяют ни подтвердить, ни опровергнуть гипотезу о его самостоятельном влиянии на метаболические показатели. Этот пример подчёркивает методологически значимое ограничение: результаты исследования сохраняют доказательную ценность лишь в отношении той экспозиции, которая была непосредственно определена и изучена в его дизайне. Замена исследуемого продукта сходным, но не идентичным видом жира выходит за пределы допустимой интерпретации полученных данных.

Совокупность доклинических работ имеет одну общую черту: результат зависит от доли жира в рационе, соотношения макронутриентов, длительности вмешательства, генетической линии животных и жира сравнения. Именно эта зависимость ослабляет попытки перенести единичный эксперимент на общую диетическую рекомендацию. Следующий раздел показывает, что аналогичная неоднородность характерна и для растительных масел, хотя доказательная база у человека для части из них существенно шире.

Растительные масла

Категория «растительные масла» не представляет собой ни химически, ни клинически однородную группу. Зонтичный обзор Voon et al. (2024), обобщивший систематические обзоры и метаанализы по отдельным видам пищевых масел, показал, что направление, величина и достоверность выявляемых эффектов зависят как от конкретного масла, так и от оцениваемого исхода. Масла с более высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот в ряде исследований ассоциировались с более благоприятными изменениями липидного профиля, однако эти результаты не были единообразными

по всем видам масел и показателям. Следовательно, растительное происхождение само по себе не может рассматриваться как достаточное основание для отнесения масла к категории метаболически благоприятных продуктов. В частности, пальмовое и кокосовое масла отличаются по жирнокислотному составу от рапсового, оливкового и соевого масел, поэтому результаты исследований последних не могут быть автоматически распространены на всю совокупность растительных масел.

Наиболее согласованные данные относятся к линолевой кислоте как к определённому нутриенту, а не к широкой категории омега-6 жирных кислот или к растительным маслам как единой группе продуктов. В дозозависимом метаанализе 31 проспективной когорты Mousavi et al. (2021), включившем 297 685 участников и 22 639 случаев впервые выявленного диабета 2 типа, более высокое потребление линолевой кислоты ассоциировалось с более низким риском заболевания. При сопоставлении крайних категорий потребления относительный риск составил 0,94. Вместе с тем полученная связь имеет наблюдательный характер и не может рассматриваться как доказательство причинного профилактического эффекта. Она указывает на возможную значимость замещения одних пищевых жиров другими в составе рациона, но не позволяет заключить, что увеличение потребления любого масла, содержащего линолевую кислоту, само по себе предотвращает развитие диабета 2 типа у отдельного человека.

Рандомизированные данные подтверждают более узкий, но причинно более сильный вывод для липидного обмена. В метаанализе 40 контролируемых испытаний Wang et al. (2023) замена контрольных жиров линолевой кислотой сопровождалась снижением LDL-холестерина, особенно в сравнениях, где линолевая кислота замещала насыщенные жирные кислоты. При этом работы оценивали преимущественно липидные показатели, а не инфаркты, инсульты или смертность. Следовательно, снижение LDL-холестерина поддерживает благоприятность конкретной нутриентной замены, но не даёт права представить линолевую кислоту или масло, содержащее её, как самостоятельно доказанное средство профилактики всех кардиометаболических заболеваний.

Сопоставления отдельных растительных масел в контролируемых вмешательствах показывают, что интерпретация их эффектов должна основываться на конкретном рационе сравнения, а не на общем представлении о масле как о «благоприятном» продукте. В метаанализе

33 рандомизированных исследований Morvaridzadeh et al. (2024) потребление оливкового масла первого холодного отжима сопровождалось снижением концентрации инсулина и индекса HOMA-IR, тогда как статистически убедительных различий по глюкозе натощак, LDL-холестерину, триглицеридам и артериальному давлению выявлено не было. В метаанализе 13 рандомизированных испытаний Pourrajab et al. (2023) потребление рапсового масла, по сравнению с оливковым, ассоциировалось с более низкой концентрацией LDL-холестерина. Эти результаты не позволяют выстроить универсальную иерархию пищевых масел по степени их полезности. Вместе с тем они показывают, что масла, обычно относимые к источникам преимущественно ненасыщенных жирных кислот, могут различаться по влиянию на отдельные метаболические показатели в зависимости от жирнокислотного состава, дозы, продолжительности вмешательства, характеристик участников и, прежде всего, жира, который они замещают в рационе.

Сходное ограничение относится к данным о соевом масле. Контролируемое исследование Baer et al. (2021) зафиксировало более благоприятный липопротеиновый профиль высокоолеинового соевого масла

по сравнению со смесью пальмовых масел. Однако высокоолеиновое соевое масло имеет иной жирнокислотный профиль, чем обычное соевое масло, а смесь пальмовых масел не является нейтральным сравнением. Поэтому данное исследование нельзя использовать ни как доказательство пользы обычного соевого масла, ни как опровержение опасений по поводу всех так называемых «seed oils». Её корректный вывод касается именно сопоставления двух строго определённых жиров в конкретной интервенции.

Оценка влияния отдельных растительных масел на массу тела требует особенно осторожной интерпретации. Сетевой метаанализ Abdollahi et al. (2024), включивший 42 рандомизированных контролируемых испытания, выявил различия в ранжировании масел по изменениям массы тела. Однако авторы оценили определённость доказательств по большинству сравнений как низкую или умеренную, а продолжительность включённых исследований в большинстве случаев ограничивалась несколькими месяцами. Кроме того, изменение массы тела в подобных вмешательствах определяется не только видом потребляемого жира, но и общей энергетической ценностью рациона, степенью энергетической

Таблица 2
Ключевые публикации и пределы их интерпретации

Table 2
Key Publications and the Scope of Their Interpretability

Источник	Дизайн и объект	Основной результат	Предел интерпретации
Guo et al. (2024)	Комментарий; экологические и доклинические данные	Выдвинута гипотеза о необходимости переоценки роли сала в диабете	Не содержит нового набора данных и не устанавливает причинный эффект у человека.
Liu et al. (2023a)	12-недельное контролируемое питание; 345 здоровых взрослых	Смесь сала и соевого масла сильнее снижала АЛПТ и АСТ, чем чистые масла	Аминотрансферазы не являются клиническим исходом; сало отдельно не показало преимущества.
Liu et al. (2023b)	12-недельное контролируемое питание; 334 здоровых взрослых	Смесь сопровождалась более выраженным снижением артериального давления	Различий по глюкозе и липидам между чистым салом и соевым маслом не выявлено.
Zhou et al. (2023); Chu et al. (2024)	Эксперименты на мышах	Эффекты сала зависят от модели, доли жира и масла сравнения	Доклинические данные не определяют эффект обычного рациона человека.
Mousavi et al. (2021)	Метаанализ 31 проспективной когорты	Более высокое потребление линолевой кислоты связано с меньшим риском диабета 2 типа	Наблюдательный дизайн не устраняет остаточное смешение факторов.
Wang et al. (2023)	Метаанализ 40 РКИ	Линолевая кислота снижала LDL-холестерин в рационах сравнения	Оценивались преимущественно биомаркеры, не клинические события.
Voon et al. (2024)	Зонтичный обзор	Эффекты зависят от конкретного растительного масла и исхода	Не позволяет заменить сравнение конкретных масел категорией «растительные масла».
Zhao et al. (2024); Zhang et al. (2025)	Длительные проспективные когорты	Растительные масла ассоциированы с более низкой смертностью, животные жиры с более высокой	Ассоциации не являются лард-специфичными и не доказывают причинность.

компенсации, соблюдением предписанного питания и исходной структурой пищевого потребления участников. Следовательно, полученные результаты не позволяют приписывать отдельному растительному маслу самостоятельное причинное действие в отношении развития или профилактики ожирения. Они лишь подтверждают, что эффекты пищевых масел на показатели массы тела не могут быть выведены из их растительного происхождения и должны интерпретироваться в контексте конкретного рациона, модели замещения и энергетического баланса.

Ключевые исследования, рассмотренные в разделах, посвящённых салу и растительным маслам, а также пределы допустимой интерпретации их результатов обобщены в Таблице 2.

Замещение насыщенных жиров ненасыщенными

Ключевой вопрос для причинной интерпретации состоит не в самом факте присутствия в рационе сала или растительного масла, а в том, какой пищевой компонент замещается при изменении их потребления. Метаболические последствия снижения доли сала будут различаться в зависимости от того, сопровождается ли оно увеличением потребления рафинированных углеводов и ультрапереработанных продуктов либо замещением насыщенных жирных кислот мононенасыщенными или полиненасыщенными жирными кислотами. Следовательно, указание на сокращение потребления насыщенных жиров без определения замещающего нутриента или пищевого продукта не имеет однозначного биологического и клинического содержания. Модель изокалорийного замещения является поэтому не второстепенной методологической деталью, а необходимым условием обоснованной интерпретации эффектов пищевых жиров.

Рекомендация Всемирной организации здравоохранения сформулирована в соответствии с логикой изокалорийного замещения. В руководстве 2023 года предлагается ограничивать потребление насыщенных жирных кислот, преимущественно заменяя их ненасыщенными жирными кислотами либо углеводами, поступающими из продуктов, естественно содержащих пищевые волокна (World Health Organization, 2023). Такая позиция не предполагает исключения одного конкретного жира и не позволяет интерпретировать рас-

чительное происхождение масла как самостоятельный признак его благоприятного действия. Её доказательная основа связана с качеством замещающего нутриента и пищевого продукта, в составе которого он потребляется. Следовательно, практическое значение имеет не только сокращение доли насыщенных жирных кислот, но и определение той пищевой альтернативы, которой они замещаются в рационе.

Долгосрочные когортные исследования в целом согласуются с логикой пищевого замещения, однако не позволяют установить причинный эффект. В исследовании Zhao et al. (2024), выполненном на материале NIH-AARP Diet and Health Study и включившем 407 531 участника с периодом наблюдения до 24 лет, более высокое потребление растительных жиров и жиров из растительных масел ассоциировалось с более низким риском общей и сердечно-сосудистой смертности. Напротив, более высокое суммарное потребление животных жиров было связано с более высоким риском этих исходов. Вместе с тем экспозиции в данном анализе определены на высоком уровне обобщения. Категория «животный жир» не может быть отождествлена со свиным салом, тогда как категория «растительное масло» не позволяет установить конкретный вид масла, особенности его кулинарного применения или пищевой компонент, который оно замещало в рационе. Поэтому результаты исследования поддерживают общую гипотезу о различиях между источниками пищевых жиров, но не дают оснований для самостоятельного вывода о влиянии сала на риск смертности или другие кардиометаболические исходы.

Сходные результаты получены в анализе Zhang et al. (2025), выполненном на материалах трёх американских проспективных когорт. Более высокое потребление растительных масел ассоциировалось с более низким риском общей смертности и смертности от рака, тогда как более высокое потребление сливочного масла было связано с более высоким риском общей смертности. К сильным сторонам исследования относятся длительный период наблюдения и повторная оценка характера питания, позволяющая учитывать его изменения во времени. Вместе с тем наблюдательный дизайн не исключает остаточного смешения факторов: участники с различным уровнем потребления масел могут различаться по образованию, физической активности, статусу курения, общему качеству рациона и иным характеристикам, связанным с прогнозом здоровья. Сле-

довательно, результаты усиливают аргумент в пользу потенциальной значимости замещения животных жиров растительными маслами в составе рациона, однако не устанавливают причинного эффекта конкретного продукта и не устраняют потребность в контролируемых исследованиях с чётко определёнными пищевыми интервенциями.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основной вывод настоящего обзора состоит в том, что включённые в него исследования не подтверждают самостоятельного профилактического действия свиного сала в отношении диабета 2 типа или сердечно-сосудистых заболеваний. Комментарий Guo et al. (2024) обоснованно поставил вопрос о необходимости более дифференцированного анализа пищевых жиров, однако его доказательная функция ограничена формулированием гипотезы. В рамках настоящего обзора были выявлены два краткосрочных контролируемых исследования у здоровых взрослых, в которых сопоставлялись сало, соевое масло и их смесь. В обоих исследованиях более благоприятные изменения были связаны со смесью сала и соевого масла, тогда как чистое сало не продемонстрировало преимуществ по показателям глюкозы или липидного профиля по сравнению с соевым маслом (Liu et al., 2023a; Liu et al., 2023b). Следовательно, имеющиеся данные не позволяют переносить эффект композиции двух жиров на один из её компонентов и интерпретировать его как подтверждение самостоятельной метаболической пользы сала.

Вместе с тем отсутствие подтверждённого профилактического эффекта не является доказательством уникального неблагоприятного действия умеренного потребления сала. Для причинного вывода такого рода необходимы длительные исследования с чётко определённой экспозицией, оценкой дозы, способа кулинарного использования, общей энергетической ценности рациона, качества сопутствующих углеводов и характера замещающего жира. Два выявленных контролируемых исследования продолжались 12 недель, включали здоровых участников и были ориентированы преимущественно на промежуточные метаболические показатели, а не на новые случаи диабета, сердечно-сосудистые события или смертность (Liu et al., 2023a; Liu et al., 2023b). Поэтому на современном этапе корректно говорить не о доказанной нейтральности или доказанном вреде сала как такового, а о недостаточности

прямых данных для его самостоятельной клинической оценки.

Интерпретация имеющихся результатов требует последовательного разграничения клинических исходов, метаболических показателей и доклинических наблюдений. Изменение активности аминотрансфераз в краткосрочном вмешательстве не доказывает профилактику или лечение заболеваний печени, так же как краткосрочное снижение артериального давления не устанавливает уменьшение риска инсульта или других сердечно-сосудистых событий. Аналогично результаты экспериментов на животных могут уточнять возможные механизмы действия жировых смесей, но не заменяют исследования питания человека с клинически значимыми исходами (Yan et al., 2022; Zhou et al., 2023; Chu et al., 2024). Соблюдение этой иерархии необходимо для предотвращения как необоснованной «реабилитации» сала, так и чрезмерного переноса неблагоприятных результатов отдельных моделей на обычный рацион человека.

Полученные данные также не поддерживают представление о растительных маслах как о единой функциональной категории. Зонтичный обзор Voon et al. (2024) показал, что направление и определённость эффектов различаются в зависимости от конкретного масла и оцениваемого исхода. Это согласуется с данными прямых сравнений отдельных масел. Так, метаанализ Pourrajab et al. (2023) выявил более низкие значения LDL-холестерина при употреблении рапсового масла по сравнению с оливковым, тогда как метаанализ Morvaridzadeh et al. (2024) показал для оливкового масла первого холодного отжима отдельные благоприятные изменения показателей инсулинорезистентности при отсутствии статистически убедительных различий по ряду других кардиометаболических маркеров. Следовательно, научно обоснованная оценка требует указывать конкретный вид масла, количество, длительность употребления, рацион сравнения и оцениваемый исход. Само по себе растительное происхождение жира не является достаточным критерием его ожидаемого метаболического действия.

Наиболее устойчивый вывод относится не к преимуществу отдельного продукта, а к характеру пищевого замещения. В метаанализе проспективных когорт более высокое потребление линолевой кислоты ассоциировалось с более низким риском диабета 2 типа, однако данный результат сохраняет наблюдательный характер

(Mousavi et al., 2021). В метаанализе рандомизированных исследований замена контрольных жиров линолевой кислотой сопровождалась снижением LDL-холестерина, прежде всего в сравнениях с насыщенными жирными кислотами, но клинические сердечно-сосудистые исходы в этих работах преимущественно не оценивались (Wang et al., 2023). Наблюдательные исследования Zhao et al. (2024) и Zhang et al. (2025) также поддерживают гипотезу о потенциальной благоприятности замещения части животных жиров растительными маслами, однако широкие категории экспозиций и остаточное смешение факторов не позволяют приписать выявленные ассоциации одному конкретному маслу или жиру.

Таким образом, практическая интерпретация должна основываться на модели изокалорийного замещения, а не на противопоставлении «животного» и «растительного» жира как двух однородных категорий. Этот подход согласуется с руководством Всемирной организации здравоохранения, которое рекомендует ограничивать поступление насыщенных жирных кислот и преимущественно заменять их ненасыщенными жирными кислотами либо углеводами из продуктов, естественно содержащих пищевые волокна (World Health Organization, 2023). Однако данная рекомендация не устанавливает универсальную иерархию всех пищевых масел и не освобождает от необходимости учитывать пищевую матрицу, способ приготовления пищи, общую калорийность и структуру рациона. В отношении сала наиболее обоснованной остаётся позиция, согласно которой его профилактическая польза не подтверждена, тогда как вопрос о долгосрочном самостоятельном влиянии умеренного потребления на клинические исходы остаётся недостаточно изученным.

Методологические следствия и дальнейшие направления исследований

В дальнейших исследованиях необходимо перейти от общего вопроса о том, является ли сало «полезным» или «вредным», к сопоставлению заранее определённых изокалорийных моделей замещения. Информативное рандомизированное контролируемое испытание должно сравнивать рационы, в которых одинаковая доля энергии из жиров поступает из сала, рапсового, оливкового или соевого масла, а при наличии самостоятельной гипотезы также из стандартизированных смесей этих жиров. При этом необходимо обеспечить сопоставимость рационов по общей энергетической

ценности, содержанию белка, углеводов, пищевых волокон и общей доле жира. Только при таких условиях различия между группами могут быть с достаточным основанием отнесены к составу замещающего жира, а не к различиям в калорийности или иных компонентах питания.

Дизайн вмешательства должен предусматривать стандартизацию способа кулинарного использования жиров, включая температуру и продолжительность нагревания, кратность повторного использования масла и тип продуктов, в составе которых потребляется исследуемый жир. Существенным условием является также контроль фактического соблюдения назначенного рациона. Наряду с пищевыми дневниками и контролируемой выдачей продуктов он может включать определение биомаркеров жирнокислотного состава в крови или других биологических средах, если их валидность для соответствующей пищевой экспозиции подтверждена. Без документированного контроля соблюдения вмешательства выявленные различия могут отражать не эффект назначенного рациона, а различия между фактически потреблёнными продуктами.

В будущем испытания целесообразно включать не только здоровых взрослых, но и группы с повышенной вероятностью неблагоприятных кардиометаболических исходов: лиц с предиабетом, ожирением, метаболически ассоциированной жировой болезнью печени, дислипидемией или повышенным сердечно-сосудистым риском. Первичные и вторичные исходы следует разграничивать заранее. Для среднесрочных вмешательств обоснованными первичными исходами могут быть показатели углеводного и липидного обмена, включая гликированный гемоглобин, глюкозу и инсулин натощак, HOMA-IR, LDL-холестерин, non-HDL-холестерин, аполипопротеин В и триглицериды. Дополнительную информацию могут предоставить артериальное давление, показатели состава тела и количественная оценка содержания жира в печени. Вместе с тем эти показатели не заменяют данные о заболеваемости диабетом 2 типа, сердечно-сосудистых событиях и смертности. Оценка таких клинических исходов требует существенно большей продолжительности наблюдения, чем 12 недель, а также выборки, достаточной для выявления различий в частоте событий.

Наблюдательные исследования также нуждаются в более точном определении экспозиции. Объединение сала, молочного жира, жиров, поступающих из пе-

переработанных мясных продуктов, и жира птицы в единую категорию «животный жир» скрывает различия как в жирнокислотном составе, так и в пищевой матрице, способах приготовления и сопутствующем пищевом поведении. Аналогичное ограничение возникает при объединении рапсового, оливкового, соевого, пальмового и кокосового масел в общую категорию «растительные масла». Будущие когорты должны фиксировать конкретный вид жира или масла, количество, способ кулинарного использования, пищевой источник и компонент рациона, который данный продукт замещает. Только раздельный анализ определённых жиров в заранее заданных моделях замещения позволит отличить возможный эффект конкретного продукта от влияния общего пищевого паттерна и связанных с ним поведенческих факторов.

Ограничения

Настоящий обзор имеет ограничения. Во-первых, он выполнен в жанре критического обзора с систематизированным поиском, а не в формате метаанализа, поэтому не рассчитывает единый объединённый эффект для гетерогенных вмешательств. Во-вторых, прямые исследования сала у человека немногочисленны и краткосрочны, что ограничивает возможность уверенных выводов независимо от качества их исполнения. В-третьих, значительная часть аргументов в публичной дискуссии основана на исследованиях животных, которые были проанализированы как контекст для проверки гипотез, но не как клинические доказательства. Эти ограничения не ослабляют основной вывод, а определяют его границы: вопрос о длительном влиянии сала на клинические исходы остаётся недостаточно изученным.

Вместе с тем обзор имеет методологическое преимущество, поскольку оценка доказательств в нём строится с учётом различий между клиническими исходами, метаболическими показателями и доклиническими наблюдениями. Такой подход позволяет, с одной стороны, констатировать отсутствие достаточных оснований для признания сала самостоятельным профилактическим фактором, а с другой - избежать распространения выводов, полученных для отдельных животных жиров, моделей питания или экспериментальных условий, на всю категорию животных жиров. Тем самым формулируются

выводы, границы которых определены характером доступных данных, и обозначаются конкретные направления, в которых необходимы дальнейшие исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная доказательная база не подтверждает самостоятельного антидиабетического или кардиопротективного действия свиного сала. Имеющиеся прямые исследования на выборке из взрослых здоровых респондентов не позволяют отнести сало к факторам профилактики диабета 2 типа, дислипидемии или сердечно-сосудистых заболеваний, поскольку они ограничены краткой продолжительностью, изучением преимущественно промежуточных метаболических показателей и отсутствием данных о клинических исходах. При этом отсутствие подтверждённой профилактической пользы не следует интерпретировать как доказательство уникального неблагоприятного действия умеренного потребления сала: для такого вывода также недостаточно длительных исследований с точно определённой экспозицией и моделью пищевого замещения.

Растительные масла также не образуют единую метаболически благоприятную категорию. Их возможные эффекты определяются жирнокислотным составом, пищевой матрицей, количеством потребления, способом кулинарного использования и тем компонентом рациона, который они заменяют. Наиболее обоснованный вывод относится не к преимуществу отдельного масла или происхождению жира, а к замене части насыщенных жирных кислот ненасыщенными в составе изокалорийного и в целом качественного рациона.

Следовательно, оценка пищевых жиров не должна строиться на противопоставлении «животных» и «растительных» источников как однородных категорий. Для клинической и общественной практики существенны конкретный вид жира, его количество, способ употребления, продукт или нутриент замещения и общий пищевой паттерн. На современном этапе свиное сало следует рассматривать как жир, для которого профилактическая польза не доказана, а долгосрочное самостоятельное влияние на клинические кардиометаболические исходы остаётся недостаточно изученным.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCE

- Abdollahi, S., Soltani, S., Ramezani-Jolfaie, N., Mohammadi, M., Sherafatmanesh, S., Lorzadeh, E., & Salehi-Abargouei, A. (2024). The effect of different edible oils on body weight: A systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials. *BMC Nutrition*, 10, 107. <https://doi.org/10.1186/s40795-024-00907-0>
- Baer, D. J., Henderson, T., & Gebauer, S. K. (2021). Consumption of high-oleic soybean oil improves lipid and lipoprotein profile in humans compared to a palm oil blend: A randomized controlled trial. *Lipids*, 56(3), 313-325. <https://doi.org/10.1002/lipd.12298>
- Chu, D.-T., Thi, H. V., Bui, N.-L., & Le, N.-H. (2024). The effects of a diet with high fat content from lard on the health and adipose-markers' mRNA expression in mice. *Science Progress*, 107(3), 368504241269431. <https://doi.org/10.1177/00368504241269431>
- Guo, F., Wu, X., Yan, S., Liu, X., Li, X., Wen, L., & Wang, J. (2024). It is time to reevaluate the lard in glucose homeostasis and diabetes pathogenesis. *npj Science of Food*, 8, 109. <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00357-9>
- Liu, Z., Yuan, J., Wen, P., Guo, X., Li, K., Wang, Y., Liu, R., Guo, Y., & Li, D. (2023a). Effect of lard or plus soybean oil on markers of liver function in healthy subjects: A randomized controlled-feeding trial. *Foods*, 12(9), 1894. <https://doi.org/10.3390/foods12091894>
- Liu, Z., Yuan, J., Wen, P., Guo, X., Wen, H., Guo, Y., & Li, D. (2023b). Effect of lard plus soybean oil on blood pressure and other cardiometabolic risk factors in healthy subjects: A randomized controlled-feeding trial. *Food & Function*, 14(15), 7117-7129. <https://doi.org/10.1039/D3FO01765F>
- Morvaridzadeh, M., Cohen, A. A., Heshmati, J., Alami, M., Berrougui, H., Zoubdane, N., Pizarro, A. B., & Khalil, A. (2024). Effect of extra virgin olive oil on anthropometric indices, inflammatory and cardiometabolic markers: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *The Journal of Nutrition*, 154(1), 95-120. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2023.10.028>
- Mousavi, S. M., Jalilpiran, Y., Karimi, E., Aune, D., Larijani, B., Mozaffarian, D., Willett, W. C., & Esmailzadeh, A. (2021). Dietary intake of linoleic acid, its concentrations, and the risk of type 2 diabetes: A systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *Diabetes Care*, 44(9), 2173-2181. <https://doi.org/10.2337/dc21-0438>
- Petersen, K. S., Maki, K. C., Calder, P. C., Belury, M. A., Messina, M., Kirkpatrick, C. F., & Harris, W. S. (2024). Perspective on the health effects of unsaturated fatty acids and commonly consumed plant oils high in unsaturated fat. *British Journal of Nutrition*, 132(8), 1039-1050. <https://doi.org/10.1017/S0007114524002459>
- Pourrajab, B., Sharifi-Zahabi, E., Soltani, S., Shahinfar, H., & Shidfar, F. (2023). Comparison of canola oil and olive oil consumption on the serum lipid profile in adults: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(33), 12270-12284. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2100314>
- Rosqvist, F., & Niinistö, S. (2024). Fats and oils: A scoping review for Nordic Nutrition Recommendations 2023. *Food & Nutrition Research*, 68, 10487. <https://doi.org/10.29219/fnr.v68.10487>
- Voon, P. T., Ng, C. M., Ng, Y. T., Wong, Y. J., Yap, S. Y., Leong, S. L., Yong, X. S., & Lee, S. W. (2024). Health effects of various edible vegetable oils: An umbrella review. *Advances in Nutrition*, 15(9), 100276. <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2024.100276>
- Wang, Q., Zhang, H., Jin, Q., & Wang, X. (2023). Effects of dietary linoleic acid on blood lipid profiles: A systematic review and meta-analysis of 40 randomized controlled trials. *Foods*, 12(11), 2129. <https://doi.org/10.3390/foods12112129>
- World Health Organization. (2023). *Saturated fatty acid and trans-fatty acid intake for adults and children: WHO guideline*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240073630>

- Yan, S., Liu, S., Qu, J., Li, X., Hu, J., Zhang, L., Liu, X., Li, X., Wang, X., Wen, L., & Wang, J. (2022). A lard and soybean oil mixture alleviates low-fat-high-carbohydrate diet-induced nonalcoholic fatty liver disease in mice. *Nutrients*, 14(3), 560. <https://doi.org/10.3390/nu14030560>
- Zhang, Y., Chadaideh, K. S., Li, Y., Li, Y., Gu, X., Liu, Y., Guasch-Ferré, M., Rimm, E. B., Hu, F. B., Willett, W. C., Stampfer, M. J., & Wang, D. D. (2025). Butter and plant-based oils intake and mortality. *JAMA Internal Medicine*, 185(5), 549-560. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2025.0205>
- Zhao, B., Gan, L., Graubard, B. I., Männistö, S., Fang, F., Weinstein, S. J., Liao, L. M., Sinha, R., Chen, X., Albanes, D., & Huang, J. (2024). Plant and animal fat intake and overall and cardiovascular disease mortality. *JAMA Internal Medicine*, 184(10), 1234-1245. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2024.3799>
- Zhou, Y., Zhang, L., Guo, F., Liu, X., Li, X., Han, Z., Li, X., Shi, X., Wen, L., & Wang, J. (2023). Metabolomic and transcriptomic analysis of effects of three MUFA-rich oils on hepatic glucose and lipid metabolism in mice. *Molecular Nutrition & Food Research*, 67(23), e2300398. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202300398>
- Zommara, M. A., Atta, M. B., Hung, M.-C., Imaizumi, K., & Ghanimah, M. (2025). Impact of olive oil and different animal fats on tissue lipid profiles of C57BL/6N mice fed non-atherogenic diet. *Scientific Reports*, 15, 29537. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14995-w>

ОБ АВТОРЕ

Лаптева Елена Александровна, кандидат биологических наук, доцент кафедры «Биотехнологии и биоорганического синтеза» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский биотехнологический университет» (125080, г.Москва, Волоколамское шоссе, дом 11). ORCID: 0000-0002-7716-4041. SPIN-code: 6434-3203. E-mail: Laptevaea@mgupp.ru.

ABOUT THE AUTHOR

Lapteva Elena Aleksandrovna, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Biotechnology and Bioorganic Synthesis at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian Biotechnological University (125080, Moscow, Volokolamskoye highway, 11). ORCID: 0000-0002-7716-4041. SPIN-code: 6434-3203. E-mail: Laptevaea@mgupp.ru.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Поисковые выражения PubMed/MEDLINE

Поиск по салу и животным жирам:

("lard"[Title/Abstract] OR "pork fat"[Title/Abstract] OR "animal fat"[Title/Abstract] OR "rendered animal fat"[Title/Abstract]) AND ("type 2 diabetes"[Title/Abstract] OR diabetes[Title/Abstract] OR glycemic[Title/Abstract] OR glucose[Title/Abstract] OR insulin[Title/Abstract] OR lipid*[Title/Abstract] OR "cardiovascular"[Title/Abstract] OR liver[Title/Abstract]) AND ("2021/01/01"[Date - Publication] : "2026/07/04"[Date - Publication])

Поиск по растительным маслам:

("vegetable oil"[Title/Abstract] OR "plant oil"[Title/Abstract] OR "olive oil"[Title/Abstract] OR "rapeseed oil"[Title/Abstract] OR "canola oil"[Title/Abstract] OR "soybean oil"[Title/Abstract] OR "sunflower oil"[Title/Abstract] OR "corn oil"[Title/Abstract] OR "palm oil"[Title/Abstract] OR "coconut oil"[Title/Abstract]) AND ("type 2 diabetes"[Title/Abstract] OR diabetes[Title/Abstract] OR glycemic[Title/Abstract] OR glucose[Title/Abstract] OR insulin[Title/Abstract] OR lipid*[Title/Abstract] OR "cardiovascular"[Title/Abstract] OR mortality[Title/Abstract]) AND ("2021/01/01"[Date - Publication] : "2026/07/04"[Date - Publication])

Поиск по модели замещения жирных кислот:

("saturated fatty acid"[Title/Abstract] OR "saturated fat"[Title/Abstract]) AND ("polyunsaturated fatty acid"[Title/Abstract] OR "monounsaturated fatty acid"[Title/Abstract] OR "unsaturated fat"[Title/Abstract] OR substitution[Title/Abstract] OR replacement[Title/Abstract]) AND ("type 2 diabetes"[Title/Abstract] OR diabetes[Title/Abstract] OR "cardiovascular disease"[Title/Abstract] OR mortality[Title/Abstract] OR "LDL cholesterol"[Title/Abstract] OR apolipoprotein[Title/Abstract]) AND ("2021/01/01"[Date - Publication] : "2026/07/04"[Date - Publication])

Молекулярно-генетические методы видовой идентификации молока: обзор предметного поля

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

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

АННОТАЦИЯ

Введение: Видовая фальсификация молочной продукции, прежде всего незаявленное добавление коровьего молока в козье молоко и продукты его переработки, требует надёжных методов контроля подлинности. Хотя для этой задачи активно применяются молекулярно-генетические подходы, опубликованные данные остаются недостаточно сопоставимыми по ДНК-мишеням, форматам ПЦР, молочным матрицам, пределам обнаружения и критериям интерпретации, что затрудняет выбор методов для рутинного лабораторного контроля.

Цель: Провести комплексный анализ современного состояния применения молекулярно-генетических методов для выявления видовой фальсификации молочных продуктов, в контексте предотвращения незаконной фальсификации и обеспечения высококачественной продукции в пищевой промышленности.

Материалы и методы: Обзор предметного поля выполнен по протоколу PRISMA-ScR. Поиск проводили в Google Scholar, PubMed и ScienceDirect по запросам, связанным с ПЦР-анализом, ДНК, коровьим и козьим молоком и фальсификацией. Включали полнотекстовые рецензируемые эмпирические и обзорные публикации на английском языке за 2013–2025 гг. Извлекали сведения о стране исследования, объекте анализа, виде молочного сырья или продукта, методе, молекулярной мишени и основных выводах.

Результаты: В обзор включено 59 публикаций. Анализ источников показал, что молекулярно-генетические методы являются наиболее перспективным инструментом видовой идентификации молока и молочной продукции благодаря высокой чувствительности и специфичности. При этом эффективность выявления примеси коровьего молока в козьем существенно зависит от типа исследуемой матрицы, степени технологической обработки продукции, выбора генетической мишени и используемого метода амплификации и детекции ДНК. Наиболее воспроизводимые и чувствительные результаты продемонстрировали методы ПЦР в реальном времени и цифровой ПЦР, тогда как отсутствие унифицированных подходов к выбору мишеней и протоколов анализа остаётся ключевым ограничением практического применения данных методов в системе рутинного контроля подлинности молочной продукции.

Выводы: Молекулярно-генетические методы обладают высоким потенциалом для подтверждения видовой подлинности козьего молока и продуктов его переработки. Их практическое применение требует стандартизации аналитических мишеней, пробоподготовки, форматов детекции и критериев оценки результатов.

Ключевые слова: фальсификация молока; козье молоко; коровье молоко; видовая идентификация; ПЦР; молекулярно-генетические методы

Корреспонденция:

Алексей Владимирович Хан
E-mail: a_khan@vniimi.org

Конфликт интересов:

автор сообщает
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 30.01.2026

Принята: 15.06.2026

Опубликована: 30.06.2026

Финансирование

Исследование выполнено
в рамках поисковой НИР
за счет внебюджетных средств
ФГАНУ «ВНИМИ»
(тема № ВНИМИ-2026-03).

Copyright: © 2026 Авторы



Для цитирования: Хан, А.В., Лазарева, Е.Г., Коваль, Д.Д., & Фоменко, О.Ю. (2026). Молекулярно-генетические методы видовой идентификации молока: обзор предметного поля. *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 76–99. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.110>

Molecular Genetic Methods for Species Identification of Milk: A Scoping Review

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

All-Russian Dairy Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: Adulteration of dairy products, including the addition of cow's milk to goat milk, remains a relevant issue affecting product authenticity, safety, and consumer protection. This type of adulteration is of particular concern due to the potential risks for individuals sensitive to cow's milk proteins. Under these conditions, molecular genetic methods are considered a more promising approach for the detection of species adulteration in milk, as they are based on the analysis of species-specific DNA regions that are less susceptible to the effects of technological processing and biological factors compared with protein-based and physicochemical indicators.

Purpose: To conduct a comprehensive analysis of the current state of application of molecular genetic methods for the detection of species adulteration in dairy products in the context of preventing food fraud and ensuring high-quality products in the food industry.

Materials and Methods: The review was conducted in accordance with the PRISMA-ScR protocol. Publications were searched in Google Scholar, PubMed, and ScienceDirect using keywords focused on PCR analysis, DNA, goat and cow milk, and dairy product adulteration. The main inclusion criterion was the availability of data on the species identification of goat and cow milk using molecular genetic methods. During the analysis, information was extracted on the authors, year of publication, country of study, research object, animal species, methodology used, and key findings.

Results: A total of 7,437 records were identified through the screening process. After duplicate removal, 1,038 sources were retained for further analysis. During title and abstract screening, 937 publications that did not meet the inclusion criteria were excluded. Following full-text assessment of 101 articles, an additional 42 studies were excluded. Ultimately, 59 publications were included in the review. Analysis of the selected studies demonstrated that molecular genetic analytical methods are the most promising tool for species identification of milk and dairy products due to their high sensitivity and specificity. However, the effectiveness of detecting cow's milk adulteration in goat milk largely depends on the type of sample matrix, the degree of technological processing, the selected genetic target, and the DNA amplification and detection method used. Real-time PCR and digital PCR demonstrated the highest sensitivity and reproducibility, whereas the lack of standardized approaches to target selection and analytical protocols remains a major limitation for the practical implementation of these methods in routine authenticity control of dairy products.

Conclusion: The main application of the findings of the present review may be the expansion of the scientific knowledge base on molecular genetic methods for confirming the authenticity of dairy product composition, providing approaches to address species adulteration and to protect consumer interests and health. The obtained data may facilitate the effective implementation of modern analytical methods for detecting cow's milk adulteration in a wide range of products derived from non-traditional milk species. Practical implementation of the proposed approaches may contribute to improving the reliability of species identification of dairy raw materials, reducing the risk of economically motivated adulteration, and establishing reproducible protocols for testing laboratories, manufacturers, and regulatory authorities.

Keywords: milk adulteration; goat milk; cow milk; species identification; PCR; molecular genetic methods

Correspondence:

Alexey V. Khan

E-mail: a_khan@vnimi.org

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 30.01.2026

Accepted: 15.06.2026

Published: 30.06.2026

Funding

The research was supported as part of exploratory scientific research work using extra-budgetary funds from «VNIMI» (subject No. VNIMI-2026-03).

Copyright: © 2026 The Authors



To cite: Khan, A.V., Lazareva, E.G., Koval, D.D., & Fomenko, O.Yu. Molecular Genetic Methods for Species Identification of Milk: A Scoping Review. *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 76–99. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.110>

ВВЕДЕНИЕ

Стоимость козьего молока значительно превышает стоимость коровьего (Hadeef et al., 2024; Li, et al., 2023; Agustina et al., 2021). Экономическая составляющая является главным драйвером фальсификации козьего молока, которая чаще всего заключается в незаявленном добавлении коровьего молока (Li et al., 2023; Demiati et al., 2023; Ait El Alia et al., 2026; Bassi et al., 2026).

Технические регламенты Таможенного союза «О безопасности молока и молочной продукции» (ТР ТС 033/2013) и «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011) являются основными нормативными документами, устанавливающими требования, обеспечивающие предупреждение действий, вводящих в заблуждение потребителей молока и молочной продукции, включая недостоверную маркировку, подмену состава и несоответствие наименования продукции. Согласно положениям, содержащихся в данных документах идентификация пищевой продукции проводится визуальными, органолептическими и (или) аналитическими методами. Аналитический метод подразумевает определение физико-химических показателей, к числу которых относится анализ жирнокислотного состава молочного жира, являющегося основным методом идентификации видовой принадлежности молока в лабораторной практике контрольно-надзорных органов. Однако, жирнокислотный профиль коровьего, козьего и других видов молока не является уникальным (Markiewicz-Keszycka et al., 2013; Жижин, 2020; Gallier et al., 2020), существенно зависит от сезона сбора молока, условий кормления животных и других факторов (Tsiplakou et al., 2010; Saviard et al., 2026). Поэтому данный показатель не может использоваться в качестве единственного критерия видовой идентификации молока.

Ограничения использования жирнокислотного состава как критерия видовой идентификации, проявляются и при использовании других физико-химических методов. В исследовании Demiati et al. (2022) анализировали вольтамперометрические сигналы («электрохимические отпечатки») образцов козьего и коровьего молока с последующей обработкой данных методом главных компонент (PCA — Principal Component Analysis). Несмотря на наличие различий в регистрируемых сигналах, массивы данных значительно перекрывались, в результате чего PCA не обеспечивал разделение образцов по видам молока.

Подобные результаты были получены и при использовании другого физико-химического метода — спектроскопического. В работе Teixeira et al. (2021) были использованы лабораторно приготовленные модельные фальсифицированные системы образцы йогурта и сыра из козьего молока с добавлением 10–20% коровьего молока, которые были проанализированы с использованием метода Фурье-преобразованной спектроскопии в ближней инфракрасной области (FT-NIR спектроскопии). Спектры фальсифицированных и нефальсифицированных образцов имели сходный характер и не демонстрировали визуальных различий. Применение PCA не позволило разделить образцы по видам вследствие перекрытия данных. Дифференциация достигалась только при использовании дискриминантного анализа на основе метода частичных наименьших квадратов (PLS-DA). Это статистический подход классификации, основанный на обучении модели на образцах с известной видовой принадлежностью с последующим анализом неизвестных образцов. Исследователям удалось достоверно определить фальсифицированные образцы, однако исходные физико-химические показатели не обладали достаточной информативностью для дифференциации козьего и коровьего молока и требовали применения методов сложной обработки данных, что ограничивает их использование в качестве самостоятельного критерия.

Иным подходом к выявлению примесей в молоке является применение иммунологических методов, преимущественно иммуноферментного анализа (ELISA — enzyme-linked immunosorbent assay). В исследовании Levieux D. и Venien A. (1994), посвящённом выявлению примеси коровьего молока в молоке коз или овец, была разработана тест-система, основанная на двухсайтовом иммуноферментном анализе (sandwich ELISA): были использованы два моноклональных антитела к β -лактоглобулину коровьего молока, одно из которых распознаёт видоспецифичный эпитоп белка и обеспечивает селективное связывание, а второе используется для детекции образовавшегося иммунного комплекса. Разработанная тест-система продемонстрировала высокую чувствительность: предел обнаружения составил порядка 1 части коровьего молока на 100 000 частей козьего или овечьего. Чувствительность систем, основанных на иммуноферментном анализе, существенно зависит от выбора белковой мишени. Так, в работе Hurley I. P. et al. (2004) был применён непрямой конкурентный ELISA, основанный на выявлении иммуногло-

булина G коровьего молока, и показана возможность детекции примеси на уровне до 0,1 %, что примерно на два порядка ниже чувствительности системы, разработанной Levieux D. и Venien A. Иммуноферментный анализ не является универсальным методом видовой идентификации молока и молочных продуктов в силу особенностей определяемых мишеней — белков. Высокая гомология белков молока различных видов животных может приводить к перекрёстной реактивности антител и снижению специфичности анализа. Помимо этого, белки подвержены разрушению при технологической обработке, например, иммуноглобулин G сохраняет детектируемость в пастеризованном молоке, однако не определяется в образцах, подвергнутых ультравысокотемпературной обработке и высушиванию, что связано с разрушением или модификацией антигенных эпитопов (Hurley et al., 2004).

Существующие физико-химические и иммунологические методы не обеспечивают надёжной видовой идентификации молока (Hurley I. P. et al., 2004; Markiewicz-Keszycka et al., 2013; Жижин, 2020; Gallier et al., 2020; Teixeira et al., 2021; Demiati et al., 2022). Поэтому использование только этих методов не позволяет надёжно различать молоко разных видов животных и молочные продукты, приготовленные на их основе. В качестве альтернативы применяются методы, основанные на анализе ДНК, подразумевающие выявление видоспецифичных участков ДНК различных видов животных. К таким участкам относятся последовательности митохондриальной ДНК (*cytochrome b* (Di Pinto et al., 2017), *cytochrome c oxidase I* (Hebert et al., 2003), *12S rRNA* (Tortorici et al., 2016), *16S rRNA* (Mane et al., 2013), D-loop (Deb et al., 2017)), последовательности ядерной ДНК, представленной в основном генами молочных белков (κ -casein — *CSN3* (Vafin et al., 2022), β -casein — *CSN2* (Gallinat et al., 2013), α s1-casein — *CSN1S1* (D'Angelo et al., 2007)), а также микросателлитные локусы (Perga et al., 2023).

Вместе с тем, несмотря на наличие значительного числа исследований, посвящённых применению молекулярно-генетических методов для оценки подлинности молока, используемые подходы существенно различаются по выбору анализируемых мишеней и методам детекции (classical PCR (Hazra et al., 2018), qPCR (Di Pinto et al., 2017; Tsakali et al., 2019), dPCR (Zhang et al., 2020), секвенирование (Ribani et al., 2018), анализ кривых плавления (Hürkan K & Bulut, 2023) и др.), что приводит к отсутствию

унифицированного подхода к видовой идентификации молока, ограничивает воспроизводимость результатов между исследованиями и затрудняет внедрение молекулярно-генетических методов в рутинную лабораторную практику.

Целью настоящего обзора предметного поля являлась систематизация данных о молекулярно-генетических методах, применяемых для выявления примеси коровьего молока в козьем молоке и молочных продуктах на его основе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Настоящий обзор предметного поля выполнен с использованием протокола PRISMA-ScR, адаптированного для анализа публикаций, посвящённых молекулярно-генетическим методам выявления фальсификации козьего молока молоком крупного рогатого скота. В обзоре рассматривали публикации, отражающие современное состояние проблемы, основные аналитические подходы и существующие пробелы в области контроля подлинности молока и молочной продукции.

Стратегия поиска

Поиск научной литературы проводили два исследователя по трём источникам: Google Scholar, PubMed и ScienceDirect. Для отбора публикаций использовали следующие поисковые запросы:

(PCR AND cow AND goat AND milk AND adulteration);

(DNA AND cow AND goat AND milk AND adulteration);

({polymerase chain reaction} AND cow AND goat AND milk AND adulteration).

Поиск был ограничен публикациями, опубликованными в период с января 2013 года по декабрь 2025 года.

Критерии отбора источников

При формировании корпуса научных статей были отобраны полнотекстовые, рецензируемые эмпирические и обзорные работы, опубликованные на английском языке. Географических ограничений при отборе статей не устанавливали. В Таблице 1 даны критерии включения / исключения статей. При этом публикации, не соответствующие выбранным параметрам исключались из дальнейшего анализа.

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

Таблица 1
Критерии отбора источников для обзора предметного поля

Table 1
Eligibility Criteria for Source Selection in the Scoping Review

Критерий	Включение	Исключение	Обоснование
Контекст	Определение видовой идентификации КРС и коз с помощью ПЦР в молоке и молочных продуктах	Использование других методов для исследований (хроматографические, спектроскопические, иммунологические и др.)	Молекулярные методы на основе ПЦР позволяют выявлять присутствие экзогенной ДНК и выявлять видовую принадлежность в разнообразных продуктах питания, как сырых, так и прошедших термическую обработку при производстве
Биологический вид	КРС, козы	Другие виды домашнего скота (верблюды, лошади, ослы, овцы, олени, лани)	Большая доля молочного сектора приходится на крупный рогатый скот и молочную продукцию коз
Объект исследований	Молоко, молочные продукты	Мясные продукты, растительные продукты, рыбные продукты и др.	Анализируется биологический материал из молока и молочных продуктов (йогурт, сыр, сухое молоко)
Язык	Английский	Статьи на других языках	В данный обзор были взяты публикации только на английском языке для облегчения изучения значительного списка научной литературы и достоверности понимания результатов научных экспериментов
Хронологический период	С января 2013 года по декабрь 2025 год	Источники литературы, изданные ранее 2013 года	Для обеспечения актуальной информации.
Типы статей	Статьи обзорные, эмпирические	Книги, неакадемические источники, сайты	В данной работе рассматривались только рецензированные научные публикации из проверенных источников и общепринятых журналов с целью исключения ненадежных или сомнительных результатов и выводов.
Статус публикации	Опубликованные статьи	Препринты и тезисы докладов конференций	Возможность ознакомления с заявленными в обзоре публикациями

Отбор публикаций

На первом этапе проводили идентификацию публикаций по выбранным поисковым запросам. Затем удаляли дубликаты и выполняли скрининг по названию и аннотации. Полные тексты статей, соответствовавших критериям включения, анализировали на заключительном этапе отбора. Всего в результате поиска было выявлено 7437 документов. После исключения дубликатов для дальнейшего анализа оставили 1038 источников. На этапе скрининга по названию и аннотации исключили 937 публикаций, не соответствовавших критериям отбора. После анализа полного текста 101 статьи дополнительно исключили 42 публикации. В итоговый обзор вошло 59 работ.

Извлечение и анализ данных

Для каждой включённой публикации фиксировали следующие сведения: авторы, год издания, страна проведения или публикации исследования, цель работы,

исследуемый материал, вид животного, применённый метод анализа, основные выводы и DOI. В Таблице 2 представлен перечень стран, авторы из которых опубликовали исследования, отобранные для обзора.

После исключения дублей и нерелевантных источников отобранные работы выгружали в формате .ris и обрабатывали в программном обеспечении VOSviewer для визуализации взаимосвязей между ключевыми терминами, встречающимися в выбранных публикациях.

Синтез данных

Синтез данных проводили путём систематизации сведений из отобранных публикаций. При этом для каждой статьи учитывали год публикации, страну исследования, тип объекта, вид молочного сырья или готового продукта, аналитический метод, молекулярную мишень, формат интерпретации результата, основные выводы и т.п. После полученные данные группировали по выбранным параметрам. Основные направления и тренды выделяли на основании повторяемости этих признаков

Таблица 2
Распределение публикаций, включённых в обзор, по странам

Table 2
Distribution of Publications Included in the Review by Country

Страна	Количество статей	Ссылки
China	11	(Liao et al., 2017); (Guo et al., 2018) (Deng et al., 2020); (Guo et al., 2019); (El Sheikha et al., 2019); (Guo et al., 2020); (Wang et al., 2021); (Yu et al., 2021); (Zhang et al., 2022); (Wang et al., 2022); (Li et al., 2023)
Greece	6	(Ganopoulos et al., 2013); (Danezis et al., 2016); (Kalogianni, 2018); (Tsakali et al., 2019); (Tsirigoti et al., 2020); (Bougadi & Kalogianni, 2020)
Italy	6	(Agrimonti et al., 2015); (Tortorici et al., 2016); (Di Pinto et al., 2017); (Di Domenico et al., 2017); (Cosenza et al., 2019); (Di Febo et al., 2020)
India	6	(Poonia et al., 2017); (Deb et al., 2017); (Hazra et al., 2017); (Reddy et al., 2017); (Hazra et al., 2018); (Yadav et al., 2023)
Turkey	5	(Seçkin et al., 2017); (Zengin et al., 2022); (Tuncay et al., 2022); (Artuvan & Aksay, 2022); (Tuncay, 2023)
Brazil	3	(Golinelli et al., 2014); (da Silva Carvalho et al., 2015); (Giglioti et al., 2022)
Iran	2	(Khanzadi et al., 2013); (Abedini et al., 2023)
Switzerland	2	(Rentsch et al., 2013); (Cavin et al., 2016)
Thailand	2	(Choopan et al., 2017); (Sangthong et al., 2021)
South Korea	2	(Kim & Kim, 2018); (Kang, 2019)
Portugal	2	(Baptista et al., 2021); (Mafra et al., 2022)
Belgium	1	(Abbas et al., 2018)
Romania	1	(Tăbăran et al., 2014)
Libya	1	(Osman et al., 2014)
Australia	1	(Kashani & Malau-Aduli, 2014)
Slovenia	1	(Klančnik et al., 2016)
Bangladesh	1	(Azad & Ahmed, 2016)
USA	1	(Clark & García, 2017)
Spain	1	(Böhme et al., 2019)
Poland	1	(Habza-Kowalska et al., 2019)
Jordan	1	(Haddad & Abu-Romman, 2020)
Russia	1	(Vafin et al., 2022)
Cyprus	1	(Kastanos et al., 2022)

в нескольких независимых публикациях, а также с учётом результатов визуализации ключевых слов. Данный подход позволил перейти к описанию структуры предметного поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты поиска и отбора публикаций

В результате поиска по базам данных Google Scholar, PubMed и ScienceDirect было выявлено 7437 документов, потенциально относящихся к теме обзора. После удаления дубликатов для дальнейшего анализа оставили 1038 источников. На этапе скрининга по названию

и аннотации исключили 937 публикаций, не соответствовавших критериям отбора по контексту исследования, типу публикации или языку. Полнотекстовый анализ 101 статьи привёл к дополнительному исключению 42 работ. Таким образом, в итоговый обзор предметного поля вошло 59 публикаций. Этапы отбора источников представлены на Рисунке 1.

Превалирующее число исследований по результатам данного обзора составили работы из Китая (n=11), по 6 статей было опубликовано учеными из Греции, Италии и Индии, 5 статей — из Турции.

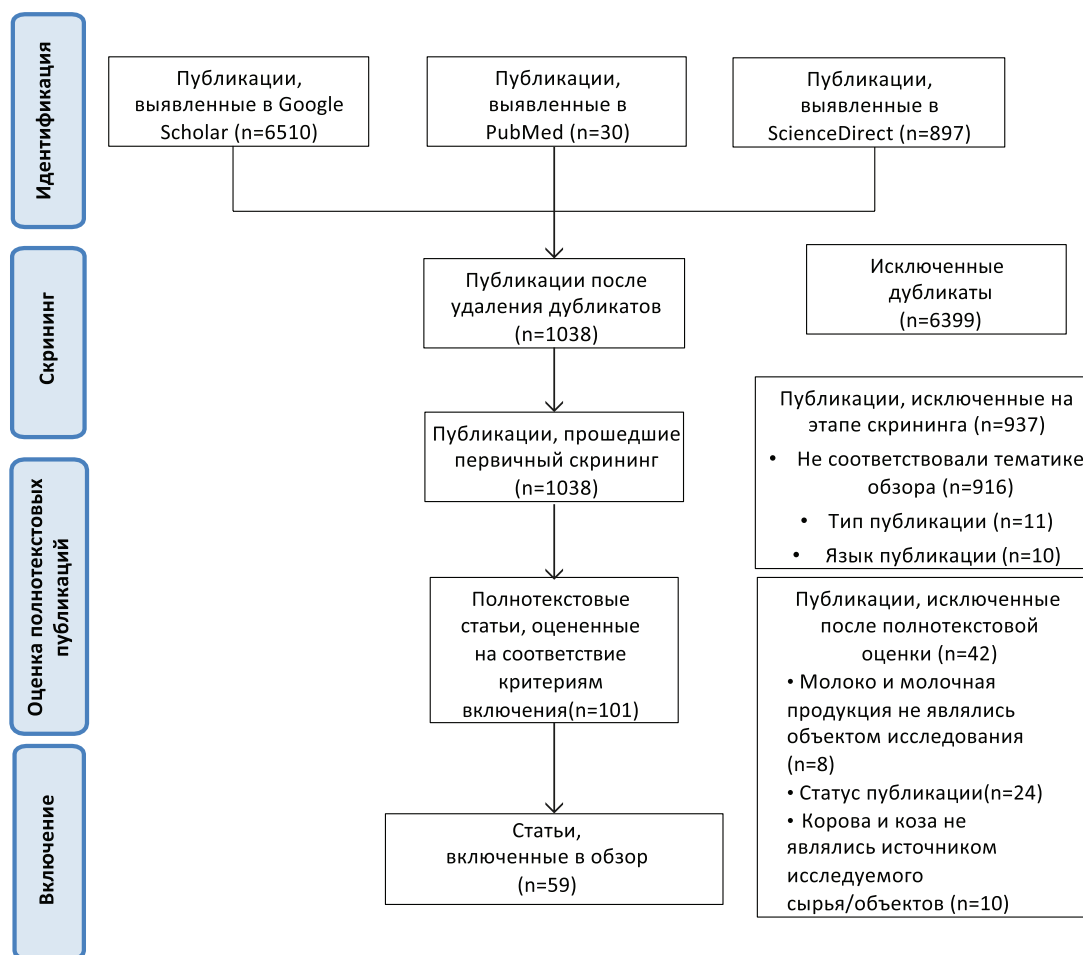
Для дополнительной характеристики структуры отобранных публикаций использовали визуализацию ключевых слов.

Рисунок 1

Схема отбора публикаций для обзора предметного поля в соответствии с PRISMA-ScR

Figure 1

Flow Diagram of Publication Selection for the Scoping Review According to PRISMA-ScR



чевых терминов с помощью программного обеспечения VOSviewer. На основе массива из 59 включённых в обзор работ было выделено 20 пересекающихся ключевых слов, отражающих основные направления исследований в области молекулярно-генетической идентификации молока и молочной продукции. Сетевая карта совместной встречаемости ключевых слов (Рисунок 2) показывает наличие устойчивых связей между терминами, относящимися к объекту исследования, виду продукции и применяемым аналитическим подходам. Размер узлов отражает частоту встречаемости ключевых слов, тогда как линии между ними характеризуют степень их совместного использования в публикациях.

Анализ структуры сети позволил выделить три основные тематические группы. Первая группа объединяет термины, связанные с видовой принадлежностью мо-

лочных продуктов и идентификации видов животных. Вторая группа отражает тип исследуемой продукции, включая молоко и различные молочные продукты. Третья группа связана с методическими подходами, применяемыми для выявления видовой фальсификации и подтверждения подлинности пищевой продукции. Данное распределение подтверждает, что текущие исследования сосредоточены не только на установлении видового состава молока, но и на адаптации и применимости молекулярно-генетических методов к различным типам молочных матриц.

Карта плотности встречаемости ключевых слов (Рисунок 3) дополняет результаты сетевого анализа и позволяет оценить, какие термины являются наиболее значимыми в исследовательском поле.

Рисунок 2

Сетевая карта совместной встречаемости ключевых слов в публикациях, включённых в обзор

Figure 2

Network Map of Keyword Co-Occurrence in Publications Included in the Review

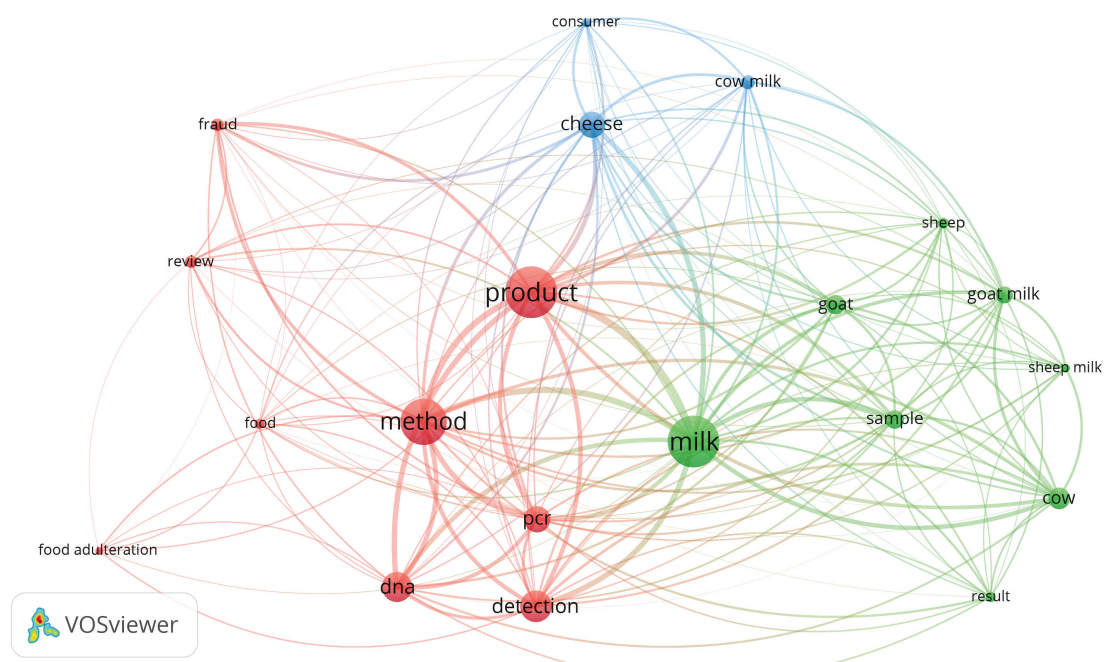


Рисунок 3

Карта плотности встречаемости ключевых слов в публикациях, включённых в обзор

Figure 3

Density Map of Keyword Occurrence in Publications Included in the Review

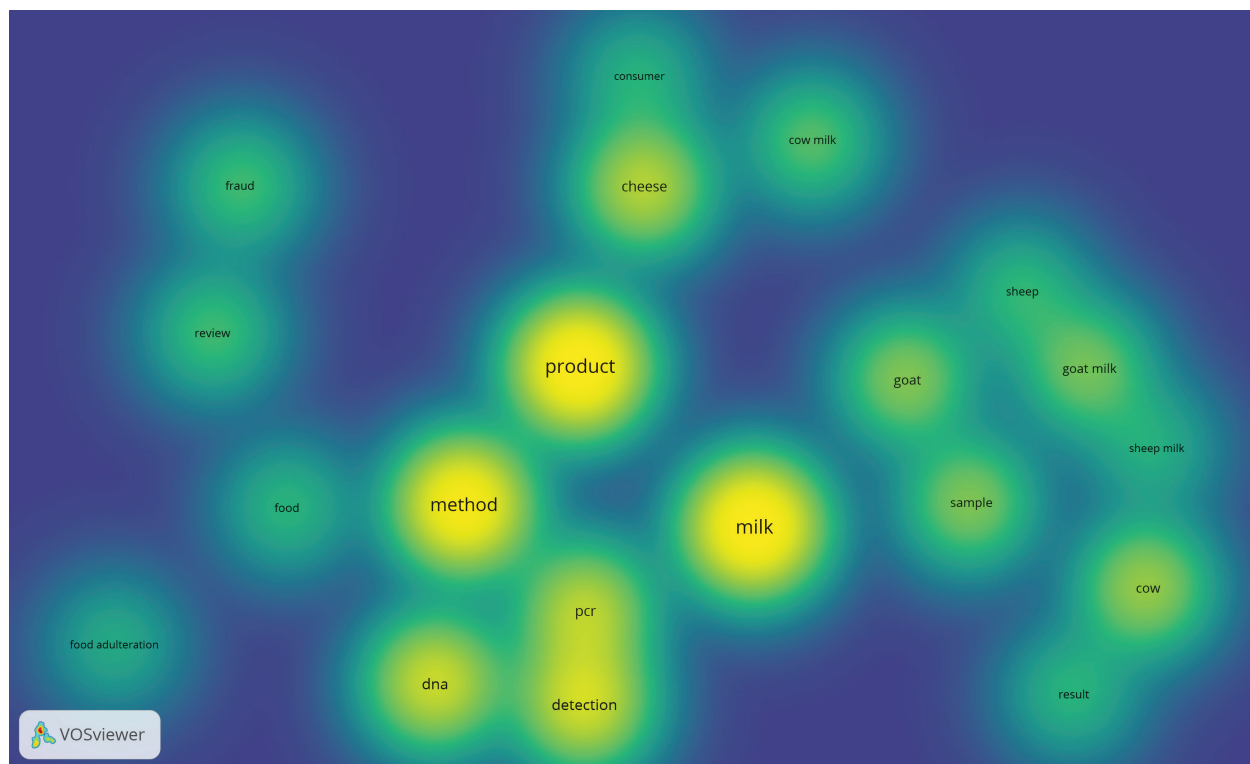
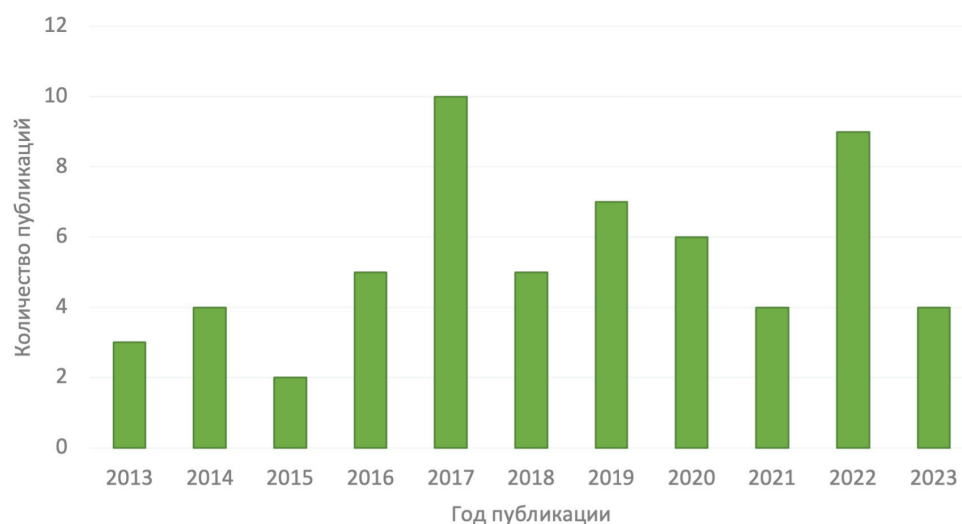


Рисунок 4

Хронологическое распределение включенных публикаций

Figure 4

Chronological Distribution of Included Publications



В совокупности результаты визуализации свидетельствуют о том, что с наиболее высокой частотой встречаемости наблюдаются ключевые слова *product*, *milk* и *method*. Современное исследовательское поле в данной области формируется на пересечении связей между определением видовой идентификации, объектом исследования и аналитическими методами.

Анализ хронологического распределения публикаций, включённых в обзор, показал, что публикационная активность в течение рассматриваемого периода была неравномерной (Рисунок 4). Наименьшее количество публикаций было выявлено в 2015 г. ($n = 2$), тогда как максимальный показатель публикационной активности пришёлся на 2017 г. ($n = 10$). В целом на период с 2017 по 2022 г. опубликована 41 публикация из 59, что составляет 69,5 % от всего корпуса работ. Данное распределение свидетельствует о повышении интереса к молекулярно-генетическим подходам для контроля подлинности молочных продуктов и выявления видовой фальсификации в молочной индустрии.

Основные направления молекулярно-генетических подходов

При систематизации данных исследований аналитические методы были сгруппированы по выбранным параметрам (Таблица 3). Показано, что исследовательское

поле представлено совокупностью видов ПЦР, изотермических и биосенсорных подходов, различающихся по пределу обнаружения, сложности выполнения и потенциального применения в молочной индустрии.

Систематизация опубликованных данных показала, что основной массив исследований сформирован вокруг методов на основе технологии ПЦР. Традиционные, качественные методы ПЦР (*simplex*, *duplex*, *multiplex* PCR) с регистрацией результатов по конечной точке (Khanzadi et al., 2013; Golinelli et al., 2014), преимущественно использовались для качественного выявления ДНК целевого вида в пищевых продуктах. Напротив, методы ПЦР-РВ с флуоресцентными красителями и TaqMan-зондами, чаще использовались для проведения количественной оценки доли определения молочных компонентов в готовой продукции.

Следует отметить, что к настоящему моменту стремительно развиваются инновационные методы экспресс-детекции, включая LAMP (Wang et al., 2022) и ДНК-биосенсоры (Bougadi & Kalogianni, 2020). Хотя вышеописанные технологии представлены меньшим числом публикаций, они отражают тенденцию к сокращению времени анализа и упрощению интерпретации результатов.

В подавляющем числе литературных источников при молекулярно-генетической идентификации молока и молочных продуктов в качестве целевых мишеней

Таблица 3

Основные молекулярно-генетические методы видовой идентификации молочных продуктов

Table 3

Basic Molecular Genetic Methods for Species Identification of Dairy Products

Молекулярно-генетический метод	Предел обнаружения (пер. LOD), %	Трудоёмкость	Применимость	Ссылки
Классическая, симплексная ПЦР (пер. Simplex PCR)	0,05–10	Средняя	Лабораторный, коммерческий скрининг образцов для определения одного целевого вида	Khanzadi et al., 2013; Osman et al., 2014; Di Pinto et al., 2017; Liao et al., 2017; Hazra et al., 2017; Hazra et al., 2018; Haddad & Abu-Romman, 2020; Zhang et al., 2022
Прямая ПЦР (пер. Direct PCR)	—	Низкая	Лабораторный, полевой, коммерческий, экспресс скрининг образцов	Choopan et al., 2017
Дуплексная ПЦР (пер. Duplex PCR)	0,01–0,05	Средняя	Лабораторный, коммерческий скрининг образцов для одновременного определения двух целевых видов	Golinelli et al., 2014; Tsakali et al., 2019; Deng et al., 2020;
Мультиплексная ПЦР (пер. Multiplex PCR)	0,1–1	Средняя	Лабораторный, коммерческий скрининг образцов для одновременного определения нескольких целевых видов	Tortorici et al., 2016; Cosenza et al., 2019; Tsirigoti et al., 2020; Sangthong et al., 2021; Kastanos et al., 2022;
ПЦР-PB, количественная ПЦР (пер. Real-time PCR, qPCR) с интеркалирующими красителями	0,1–0,5	Средняя	Лабораторный, коммерческий скрининг образцов для определения количественной оценки одного целевого вида	Rentsch et al., 2013; Agrimonti et al., 2015; Liao et al., 2017; Wang et al., 2021; Giglioti et al., 2022;
ПЦР-PB с TaqMan зондами (пер. TaqMan real-time PCR, TaqMan qPCR)	0,1–1	Средняя	Лабораторный, коммерческий скрининг образцов для одновременного определения нескольких целевых видов	Rentsch et al., 2013; Klančnik et al., 2016; Di Domenico et al., 2017; Di Pinto et al., 2017; Seçkin et al., 2017; Guo et al., 2018; Guo et al., 2019; Guo et al., 2020; Zhang et al., 2022 Di Febo et al., 2020; Zengin & Kara, 2022; Tuncay, 2023
Мультиплексная ПЦР-PB (пер. Multiplex real-time PCR)	0,1–1	Высокая	Лабораторный, коммерческий скрининг образцов для одновременного определения нескольких целевых видов	Rentsch et al., 2013 Guo et al., 2018; Guo et al., 2019; Guo et al., 2020; Tuncay & Sancak, 2022
ПЦР-ПДРФ (пер. PCR-RFLP)	—	Высокая	Лабораторный, коммерческий скрининг образцов	Vafin et al., 2022; Tăbăran et al., 2014
Высоко разрешающий анализ кривых плавления (пер. HRM-анализ)	до 0,1	Средняя	Лабораторный, коммерческий, экспресс скрининг образцов	Ganopoulos et al., 2013
Петлевая изотермическая амплификация (пер. LAMP)	0,01–5	Низкая	Лабораторный, полевой, коммерческий, экспресс скрининг образцов	Deb et al., 2017; Kim & Kim, 2018; Yu et al., 2021 Wang et al., 2022
ДНК-биосенсоры (пер. DNA biosensor)	до 0,01	Средняя	Лабораторный, коммерческий скрининг образцов	Bougadi & Kalogianni, 2020

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

преобладают митохондриальные маркеры: Наиболее часто применялись участки (12S и 16S рРНК, D-loop, *COI*, *cytb* и т.п.) что отражает интерес к высококопийным генетическим мишеням. Тем не менее, ядерные маркеры (SINE-элементы *LALBA*, *CSN3*, *DGAT1* и т.п.) встречались, хотя и значительно реже.

Кроме того, показано, что заявленные пределы обнаружения в различных молекулярно-биологических исследованиях варьировали в широком диапазоне, что потенциально отражает принципиальные различия при анализе различных типов молочных матриц.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Настоящий обзор был проведен для изучения того, как молекулярно-генетические методы применяются для видовой идентификации молочной продукции. Цель настоящего обзора — систематизация опубликованных данных о молекулярно-генетических методах определения добавления коровьего молока в козьем молоке и пищевых продуктах на его основе. В рамках настоящего обзора были проанализированы 7437 документов в период с 2013 по 2025 год, из которых после отбора в итоговый корпус вошло 59 публикаций.

Обзор предметного поля демонстрирует, что основной массив публикаций представлен исследованиями по контролю подлинности молочных продуктов из азиатских (Китай, Индия) и средиземноморских регионов (Греция, Италия и т.п.). Стоит отметить, что количество отечественных исследований незначительно. Корпус публикаций включал эмпирические (n=39) и обзорные статьи (n=20). Проведённый анализ отобранных публикаций показал, что центральное место в данной области молекулярных исследований занимают методы, основанные на амплификации ДНК, в особенности различные варианты ПЦР (классическая ПЦР, ПЦР-ПДРФ, мультиплексная ПЦР, ПЦР с интеркалирующими красителями, ПЦР с зондами и т.д.).

Помимо ПЦР-подходов, заметное развитие получили методы петлевой изотермической амплификации (LAMP). В исследованиях Deb et al. (2017), Kim & Kim (2018), Yu et al. (2021) и Wang et al. (2022) показано, что LAMP-подходы могут использоваться для визуальной экспресс-детекции и для одновременной идентификации ДНК нескольких видов животных в смесях молока. Наряду с этим ряд работ включал более сложные инновационные технологии, например, биосенсорные

системы, основанные на гибридизации ПЦР-продуктов с использованием наночастиц золота (Bougadi & Kalogianni, 2020). Также в работах Poonia et al. (2017) и Mafra et al. (2022) подробно обсуждаются методы, основанные на анализе спектров, белков и ДНК, включая различные модификации методов ПЦР, HRM, LAMP, секвенирование и биосенсоры.

Большинство публикаций включает только разработанные аналитические методы, при этом отсутствуют исследования, посвященные комплексному и сравнительному анализу молочных матриц с использованием общепринятых критериев оценки аналитических параметров различных молекулярно-генетических подходов. Кроме того, в рассмотренной литературе мало уделяется вниманию влияния пробоподготовки биоматериалов, эффективности выделения ДНК из анализируемых образцов, степени технологической обработки продуктов, воспроизводимости экспериментальных исследований и т.д. Неоднородность исследований по выбору методов молекулярной диагностики, типам молочных матриц, используемым молекулярным мишеням и т.п. приводит к сложностям суммирования и интерпретации полученных научных данных. Следовательно, литературные данные подтверждают, что универсального молекулярного анализа, эффективного для всех видов молока и молочных продуктов, пока не существует.

В рассмотренных работах, вошедших в обзор, предпочтение отдавалось преимущественно митохондриальным мишеням, что объясняется их высокой копийностью и удобством для диагностики *in vitro* сложных пищевых матриц (Agrimonti et al., 2015; Choopan et al., 2017; Deng et al., 2020). При этом ядерные, видоспецифичные генетические маркеры молочных белков реже применяются для определения видовой принадлежности готовой продукции. Так, Rentsch et al. (2013) проверяли праймеры и зонды, ориентированные на ядерные гены, в мультиплексных системах ПЦР-РВ для сырных матриц; Cosenza et al. (2019) предложили использовать элемент SINE в промоторной области гена *LALBA* в качестве видоспецифического маркера; Vafin et al. (2022) применили ПЦР-ПДРФ для качественной и относительной количественной оценки видоспецифичной ДНК с использованием мишени к к-казеину (*CSN3*). Преобладание митохондриальных мишеней в отобранных работах свидетельствует о стремлении исследователей обеспечить высокую чувствительность анализа при работе с молочной про-

дукцией. В совокупности наблюдается смещение исследовательского интереса от простого и качественного выявления примеси недобросовестной предпринимательской практики к созданию более чувствительных, быстрых и технологически удобных платформ для контроля подлинности молочных продуктов.

Значительная часть рассмотренных исследований подтверждает необходимость разработки и адаптации молекулярно-биологических протоколов к различным видам молока-сырья и продуктам его технологической обработки (сыр, йогурт, сухое молоко и т.п.) (Tsirigoti et al., 2020; Liao et al., 2017; Rentsch et al., 2013). При лизисе и последующей экстракции нуклеиновых кислот из сложных, термически обработанных пищевых матриц концентрация выделенной ДНК может быть низкой и сильно фрагментированной. В данном контексте преобладание митохондриальных локусов в качестве целевых мишеней повышает вероятность успешной амплификации и детекции целевых видоспецифичных фрагментов в образцах пищевых продуктов.

Включённые в анализ публикации показывают, что проблема аутентификации пищевых продуктов является глобальной и рассматривается в контексте контроля подлинности продукции животного происхождения. При этом молекулярные методы, в частности, рассматриваются, как подтверждающие или дополнительные технологии, применяемые в комплексе с хроматографическими, иммуноферментными и другими видами анализов при подтверждении состава пищевых продуктов. В эмпирических исследованиях по видовой идентификации существуют различия по формату интерпретации полученных данных. Ряд исследований направлен на качественное или визуально интерпретируемое выявление целевых продуктов амплификации, тогда как другие работы ориентированы на количественную, полуколичественную оценку доли примеси чужеродной ДНК.

Различия в аналитических параметрах молекулярно-генетических протоколов обусловлено неоднородностью экспериментальных условий, выбором протокола исследования, типом образцов молочных продуктов и т.д. Так Abedini et al. (2023) сосредоточили внимание на фальсификации сыров, Abbas et al. (2018) рассматривали широкий спектр аналитических методов для аутентификации пищевых продуктов животного происхождения, Azad & Ahmed (2016) и Ajay Kr. Yadav et al. (2023) уделяли основное внимание распространённым примесям в молоке и способам их выявления и т.д. Кро-

ме того, высокая копияность митохондриальных маркеров приводит к сложности установления взаимосвязи между количеством обнаруживаемой ДНК и фактической доле фальсифицированного, добавленного молока в готовой продукции. Напротив, ядерные маркеры позволяют лучше проводить количественную оценку нуклеиновых кислот, однако их применение приводит к снижению чувствительности молекулярно-генетического анализа.

Несколько предыдущих обзорных публикаций (da Silva Carvalho et al., 2015; Kalogianni, 2018; Baptista et al., 2021) рассматривали методы на основе ДНК в контексте прослеживаемости, аутентичности и подлинности пищевых продуктов. В отличие от обзорных статей (Mafra et al., 2022; Poonia et al., 2017) данный обзор предметного поля сосредоточен на выявление видовой фальсификации продуктов на основе козьего молока с использованием современных молекулярно-генетических технологий. По сравнению с ранее опубликованными работами с простой детекцией ПЦР-продуктов (Hazra et al., 2017), современные исследования ориентированы на разработку высокочувствительных методов, позволяющих проводить количественную оценку целевых мишеней в препаратах (Giglioti et al., 2022; Zengin, & Kara, 2022).

В обзоре Li et al. (2023), посвящённому применению молекулярных методов для анализа молочных продуктов не указываются факторы, влияющие на универсальность применения различных аналитических протоколов. Напротив, настоящее исследование показывает необходимость проверки и адаптации различных посгеномных методов при исследовании видового происхождения продуктов.

Данный обзор способствует пониманию того, что важно сформировать общепринятые стандартизированные протоколы молекулярно-генетического контроля продуктов народного потребления. Вместе с тем настоящий обзор не ставил целью провести оценку эффективности всех существующих методов молекулярной биологии для определения наилучшего метода видовой идентификации всех видов молока и молочных продуктов.

Настоящий обзор следует интерпретировать с учётом ряда ограничений, связанных с особенностями отбора и анализа литературных источников. В работу были включены только англоязычные публикации в трёх базах данных за ограниченный временной период, что могло уменьшить перечень доступных данных. Кро-

ме того, обзор был сфокусирован на молекулярно-генетических подходах, поэтому методы аутентификации молока, анализирующие другие виды молекул (белки, липиды и т.п.) остались за рамками анализа. Дополнительным ограничением является выраженная неоднородность опубликованных исследований по типам анализируемых образцов биологических и пищевых продуктов, используемым молекулярно-генетическим мишеням, постгеномным технологиям и форматам интерпретации результатов, что затрудняет сопоставление результатов и оценку их аналитической чувствительности, эффективности, пределов обнаружения, специфичности и практической применимости предлагаемых подходов. Важно отметить, что при написании обзора оценка методологического качества включённых публикаций не проводилась, так как основная цель заключалась не в подтверждении надёжности научных данных или высокого вклада и уровня проведённых исследований, а в формировании и структуризации релевантных научных источников.

Несмотря на это, настоящий обзор научно-технической литературы позволяет сформировать целостное представление о современном состоянии молекулярно-генетических подходов к выявлению примеси коровьего молока в козьем.

Несмотря на спрос на продукты из нетрадиционных видов молока, наличие пищевого мошенничества постгеномные исследования по данному направлению остаются неоднородными. Следовательно, будущие исследования должны быть направлены на разработку инновационных методов, пригодных для анализа широкого ассортимента пищевых продуктов. Хотя настоящий обзор не предполагает формирование методических рекомендаций полученные результаты имеют важное значение для испытательных лабораторий, производителей, надзорных органов и различных организаций по контролю состава сырья и готовой продукции в молочной индустрии. Будущими направлениями могут быть проведение сравнительного анализа маркеров ядерной и митохондриальной ДНК, изучение влияния различных режимов технологической переработки сырья на пригодность нуклеиновых кислот, разработка и стандартизация унифицированных, аналитических протоколов для мониторинга пищевых продуктов и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя молекулярно-генетические методы видовой идентификации молока как поле на стыке молекулярной биологии, пищевых систем и обеспечения продовольственной безопасности, настоящий обзор научной технической литературы рассматривает исследования от визуального определения продуктов амплификации до количественной оценки доли подмешивания молока в сложных пищевых матрицах. Совокупность проанализированных исследований, посвящённых выявлению примеси коровьего молока в козьем, указывает на формирование устойчивой методологической концепции, основанной на комбинировании методов амплификации фрагментов митохондриальной и ядерной ДНК с последующей детекцией результатов по конечной точке и в реальном времени.

Интеграция современных молекулярно-биологических подходов и классических аналитических методов демонстрирует, что только синергетическое применение вышеописанных технологий позволяет проводить геноидентификацию видовой принадлежности сырья в молочных продуктах.

В данном аспекте молекулярная идентификация может стать ключевым инструментом для определения доли фальсифицирующих молочных компонентов в готовой продукции. Анализ литературных данных указывает на необходимость разработки стандартизации панелей видоспецифичных олигонуклеотидов, требований к пробоподготовке образцов, протоколов проведения ПЦР и т.п. Полученные данные имеют значительное практическое значение для разработки стандартных протоколов молекулярной диагностики *in vitro*, позволяющих проводить мониторинг биобезопасности и сертификации молочной продукции для нужд производителей, испытательных лабораторий и надзорных органов.

Важно отметить, что существующие различия в дизайне теоретических и экспериментальных исследований, целях, ассортименте пищевых продуктов и т.п. ограничивают возможность сопоставления эмпирических данных и результатов междисциплинарных исследований. Кроме того, при отборе опубликованных научных данных финальная выборка представлена публикациями только на английском языке за ограниченный хронологический период, а также работами, выполненными в странах с использованием различных методов анализа.

Таким образом, необходимы систематизация молекулярно-биологических данных и формирование единого методического подхода для видовой фальсификации молочной продукции. Переход от разрозненных исследовательских подходов к общепринятым молекулярно-генетическим методикам является необходимым условием для обеспечения продовольственной безопасности и защиты прав потребителей.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Хан Алексей Владимирович: разработка концепции; формальный анализ; проведение исследования; написание черновика рукописи; получение финансирования.

Лазарева Екатерина Германовна: разработка концепции; формальный анализ; проведение исследования; написание черновика рукописи; визуализация.

Коваль Дарья Дмитриевна: валидация результатов; написание черновика рукописи; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Фоменко Олег Юрьевич: разработка концепции; научное руководство; административное руководство исследовательским проектом; написание рукописи — рецензирование и редактирование; получение финансирования.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Alexey V. Khan: conceptualization; formal analysis; investigation; writing — original draft preparation; funding acquisition.

Ekaterina G. Lazareva: conceptualization; formal analysis; investigation; writing — original draft preparation; visualization.

Daria D. Koval: validation; writing — original draft preparation; writing — review & editing.

Oleg Y. Fomenko: conceptualization; supervision; project administration; writing — review & editing; funding acquisition.

ЛИТЕРАТУРА

- Жижин, Н. А. (2020). Оценка жирнокислотного состава коровьего и козьего молока с точки зрения функционального воздействия на организм человека. *Сборник научных трудов ВНИМИ* (с. 181–186). М.: ВНИМИ. <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-181-186>
- Abbas, O., Zadavec, M., Baeten, V., Mikuš, T., Lešić, T., Vulić, A., Prpić, J., Jemeršić, L., & Pleadin, J. (2018). Analytical methods used for the authentication of food of animal origin. *Food Chemistry*, 246, 6-17. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.007>
- Abedini, A., Salimi, M., Mazaheri, Y., Sadighara, P., Sani, M. A., Assadpour, E., & Jafari, S. M. (2023). Assessment of cheese frauds and relevant detection methods: A systematic review. *Food Chemistry X*, 100825. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100825>
- Agrimonti, C., Pirondini, A., Marmiroli, M., & Marmiroli, N. (2015). A quadruplex PCR (qPCR) assay for adulteration in dairy products. *Food Chemistry*, 187, 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.017>
- Agustina, Y., Mulyo, J., Waluyati, L., & Mazwan, M. (2021). Consumer preferences toward goat milk. *Agriecobis: Journal of Agricultural Socioeconomics and Business*, 4(2), 100-109. <https://doi.org/10.22219/agriecobis.v4i2.15922>
- Ait El Alia, O., Chaji, S., Boukrouh, S., Kaddouri, M., Zine-Eddine, Y., & Boutoia, K. (2026). Recent advances in the authentication of goat milk and its derived products. *Journal of Food Composition and Analysis*, 152, 109037. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2026.109037>
- Artuvan, E., & Aksay, S. (2022). In food safety control overview of using real-time PCR. *Biotech Studies*, 31(2), 53–60. <https://doi.org/10.38042/biotechstudies.1159145>
- Azad, T., & Ahmed, S. (2016). Common milk adulteration and their detection techniques. *International Journal of Food Contamination*, 3(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s40550-016-0045-3>
- Baptista, M., Cunha, J. T., & Domingues, L. (2021). DNA-based approaches for dairy products authentication: A review and perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 386-397. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.043>

- Bassi, C., Nuzzi, S., Pasinetti, S., Merlo, S., & Bello, V. (2026). Authenticity assessment of goat milk: Detecting dilution with cow milk by ML-enhanced speckle pattern imaging. *Acta IMEKO*, 15(1), 1–6. <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v15i1.2209>
- Böhme, K., Calo-Mata, P., Barros-Velázquez, J., & Ortea, I. (2019). Review of recent DNA-based methods for main food-authentication topics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(14), 3854–3864. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b07016>
- Bougadi, E. T., & Kalogianni, D. P. (2020). DNA-based biosensor for food authenticity testing. *Food Chemistry*, 322, 126758. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126758>
- Canja, C. M., Mazarel, A., Lupu, M. I., Padureanu, V., & Enache, D. V. (2016). Foodstuff falsification — A nowadays problem. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II*, 9(2), 69–74.
- Cavin, C., Cottenet, G., Blancpain, C., Bessaïre, T., Frank, N., & Zbinden, P. (2016). Food adulteration: From vulnerability assessment to new analytical solutions. *Chimia*, 70(5), 329. <https://doi.org/10.2533/chimia.2016.329>
- Choopan, R., Thanakiatkrai, P., & Kitpipit, T. (2017). Simultaneous species identification in milk and dairy products using direct PCR. *Forensic Science International: Genetics Supplement Series*, 6, e214–e215. <https://doi.org/10.1016/j.fsigss.2017.09.077>
- Clark, S., & García, M. B. M. (2017). A 100-year review: Advances in goat milk research. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 10026–10044. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13287>
- Cosenza, G., Iannaccone, M., Gallo, D., & Pauciullo, A. (2019). A fast and reliable polymerase chain reaction method based on short interspersed nuclear elements detection for the discrimination of buffalo, cattle, goat, and sheep species in dairy products. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 32(6), 891. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0459>
- D'Angelo, F., Santillo, A., Sevi, A., & Albenzio, M. (2007). Technical note: A simple salting-out method for DNA extraction from milk somatic cells: Investigation into the goat CSN1S1 gene. *Journal of Dairy Science*, 90(7), 3550–3552. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0149>
- da Paixão Teixeira, J. L., dos Santos Caramês, E. T., Baptista, D. P., Gigante, M. L., & Pallone, J. A. L. (2021). Rapid adulteration detection of yogurt and cheese made from goat milk by vibrational spectroscopy and chemometric tools. *Journal of Food Composition and Analysis*, 96, 103712. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103712>
- da Silva Carvalho, A. C., Gennari, S. M., & Paschoalin, V. M. F. (2015). Consumption of animal products and frauds: DNA-based methods for the investigation of authenticity and traceability in dairy and meat-derived products — A review. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*, 52(3), 183–194. <https://doi.org/10.11606/issn.1678-4456.v52i3p183-194>
- Danezis, G. P., Tsagkaris, A. S., Camin, F., Brusica, V., & Georgiou, C. A. (2016). Food authentication: Techniques, trends and emerging approaches. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 85, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.02.026>
- Deb, R., Sengar, G. S., Singh, U., Kumar, S., Raja, T. V., Alex, R., Alyethodi, R. R., & Prakash, B. (2017). LAMP assay for rapid diagnosis of cow DNA in goat milk and meat samples. *Iranian Journal of Veterinary Research*, 18(2), 134–137
- Demiati, D., Wahyuni, W., Rafi, M., & Putra, B. (2023). The detection of goat milk adulteration with cow milk using a combination of voltammetric fingerprints and chemometrics analysis. *Chemical Papers*, 77. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02780-w>
- Deng, L., Li, A., Gao, Y., Shen, T., Yue, H., Miao, J., Li, R., & Yang, J. (2020). Detection of the bovine milk adulterated in camel, horse, and goat milk using duplex PCR. *Food Analytical Methods*, 13, 560–567. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01678-2>
- Di Domenico, M., Di Giuseppe, M., Rodríguez, J. W., & Cammà, C. (2017). Validation of a fast real-time PCR method to detect fraud and mislabeling in milk and dairy products. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 106–112. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11695>
- Di Febo, T., Schirone, M., Di Domenico, M., Visciano, P., Krasteva, I., Sonsini, L., Cerquaglia, O., Carpino, S., D'Onofrio, F., Tittarelli, M., & Luciani, M. (2020). Detection of undeclared bovine milk in different food matrices by a multi-technique approach. *International Dairy Journal*, 111, 104845. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104845>

- Di Pinto, A., Terio, V., Marchetti, P., Bottaro, M., Mottola, A., Bozzo, G., Bonerba, E., Ceci, E., & Tantillo, G. (2017). DNA-based approach for species identification of goat-milk products. *Food Chemistry*, 229, 93-97. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.067>
- El Sheikha, A. F. (2019). DNAFoil: Novel technology for the rapid detection of food adulteration. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 544-552. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.11.012>
- Gallier, S., Tolenaars, L., & Prosser, C. (2020). Whole goat milk as a source of fat and milk fat globule membrane in infant formula. *Nutrients*, 12(11), 3486. <https://doi.org/10.3390/nu12113486>
- Gallinat, J. L., Qanbari, S., Drögemüller, C., Pimentel, E. C. G., Thaller, G., & Tetens, J. (2013). DNA-based identification of novel bovine casein gene variants. *Journal of Dairy Science*, 96(1), 699-709. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5908>
- Ganopoulos, I., Sakaridis, I., Argiriou, A., Madesis, P., & Tsaftaris, A. (2013). A novel closed-tube method based on high resolution melting (HRM) analysis for authenticity testing and quantitative detection in Greek PDO Feta cheese. *Food Chemistry*, 141(2), 835-840. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.130>
- Giglioti, R., Polli, H., Azevedo, B. T., Katiki, L. M., & Vercesi Filho, A. E. (2022). Detection and quantification of adulteration in milk and dairy products: A novel and sensitive qPCR-based method. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 4, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100074>
- Golinelli, L. P., Carvalho, A. C., Casaes, R. S., Lopes, C. S., Deliza, R., Paschoalin, V. M., & Silva, J. T. (2014). Sensory analysis and species-specific PCR detect bovine milk adulteration of frescal (fresh) goat cheese. *Journal of Dairy Science*, 97(11), 6693-6699. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-7990>
- Guo, L., Qian, J. P., Guo, Y. S., Hai, X., Liu, G. Q., Luo, J. X., & Ya, M. (2018). Simultaneous identification of bovine and equine DNA in milks and dairy products inferred from triplex TaqMan real-time PCR technique. *Journal of Dairy Science*, 101(8), 6776-6786. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14408>
- Guo, L., Ya, M., Hai, X., Guo, Y. S., Li, C. D., Xu, W. L., & Cai, Q. (2019). A simultaneous triplex TaqMan real-time PCR approach for authentication of caprine and bovine meat, milk and cheese. *International Dairy Journal*, 95, 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.03.004>
- Guo, L., Yu, Y., Xu, W. L., Li, C. D., Liu, G. Q., Qi, L., & Guo, Y. S. (2020). Simultaneous detection of ovine and caprine DNA in meat and dairy products using triplex TaqMan real-time PCR. *Food Science & Nutrition*, 8(12), 6467-6476. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1936>
- Habza-Kowalska, E., Grela, M., Gryzinska, M., & Listos, P. (2019). Molecular techniques for detecting food adulteration. *Medycyna Weterynaryjna*, 75(7), 404-409. <https://doi.org/10.21521/mw.6261>
- Haddad, M., & Abu-Romman, S. (2020). PCR-based identification of bovine milk used in goat and sheep local dairy products marketed in Jordan. *EurAsian Journal of BioSciences*, 14(2), 5267-5272
- Hadeef, L., Hamad, B., & Bellabidi, M. (2024). A critical analysis of the impact of consumer attitudes and perception on goat milk consumption and influencing factors: consumer attitudes and perception towards goat milk. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 22. <https://doi.org/10.57239/PJLSS-2024-22.2.00262>
- Hazra, T., Sharma, V., Sharma, R., & Arora, S. (2017). A species specific simplex polymerase chain reaction-based approach for detection of goat tallow in heat clarified milk fat (ghee). *International Journal of Food Properties*, 20(Suppl. 1), S69-S75. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1289542>
- Hazra, T., Sharma, V., Sharma, R., & Arora, S. (2018). PCR based assay for the detection of cow milk adulteration in buffalo milk. *Indian Journal of Animal Research*, 52(3), 383-387. <https://doi.org/10.18805/ijar.11331>
- Hebert, P. D. N., Ratnasingham, S., & DeWaard, J. R. (2003). Barcoding animal life: Cytochrome c oxidase subunit 1 divergences among closely related species. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270, S96-S99.
- Hürkan, K., & Bulut, M. (2023). High resolution melting is a useful tool to detect animal species sources of various milk types. *Journal of Food Science and Technology*, 60(5), 1612-1620. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05705-3>
- Hurley, I. P., Coleman, R. C., Ireland, H. E., & Williams, J. H. H. (2004). Measurement of bovine IgG by indirect competitive ELISA as a means of detecting milk adulteration. *Journal of Dairy Science*, 87(3), 543-549. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73195-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73195-1)
- Kalogianni, D. P. (2018). DNA-based analytical methods for milk authentication. *European Food Research and Technology*, 244, 775-793. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-3016-x>

- Kang, T. S. (2019). Basic principles for developing real-time PCR methods used in food analysis: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 574–585. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.037>
- Kashani, A., & Malau-Aduli, A. E. O. (2014). Real-time PCR and real-time RT-PCR applications in food labelling and gene expression studies. *International Journal of Genetics and Genomics*, 2, 6–12
- Kastanos, E., Papanephytous, C., Georgiou, T., & Demoliou, C. (2022). A simple and fast triplex-PCR for the identification of milk's animal origin in Halloumi cheese and yoghurt. *Journal of Dairy Research*, 89(3), 323–326. <https://doi.org/10.1017/S0022029922000577>
- Khanzadi, S., Jamshidi, A., Razmyar, J., & Mohsenzadeh, M. (2013). PCR-based detection of cow and goat milk in sheep milk and dairy products marketed in Mashhad city of Iran. *Iranian Journal of Veterinary Medicine*, 7(4), 257–262
- Kim, M. J., & Kim, H. Y. (2018). Direct duplex real-time loop mediated isothermal amplification assay for the simultaneous detection of cow and goat species origin of milk and yogurt products for field use. *Food Chemistry*, 246, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.014>
- Klančnik, A., Toplak, N., Kovač, M., Ogrinc, N., & Jeršek, B. (2016). Robust PCR-based method for quantification of bovine milk in cheeses made from caprine and ovine milk. *International Journal of Dairy Technology*, 69(4), 540–549. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12287>
- Lad, S. S., Aparnathi, K. D., Mehta, B., & Velpula, S. (2017). Goat milk in human nutrition and health: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(6), 1781–1792. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.605.194>
- Levieux, D., & Venien, A. (1994). Rapid, sensitive two-site ELISA for detection of cows' milk in goats' or ewes' milk using monoclonal antibodies. *Journal of Dairy Research*, 61(1), 91–99.
- Li, B., Yu, M., Xu, W., Chen, L., & Han, J. (2023). Comparison of PCR techniques in adulteration identification of dairy products. *Agriculture*, 13(7), 1450. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071450>
- Li, J. Y., Ge, Q., Liu, B., Gao, Z. P., & Guo, C. F. (2023). Quantification of cow milk in adulterated goat milk by HPLC-MS/MS using N-acetylglucosamine as a reliable biomarker of cow milk. *Journal of Food Composition and Analysis*, 123, 105583. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105583>
- Li, W., Huang, W., Fan, D., Gao, X., Zhang, X., Meng, Y., & Liu, T. C. (2023). Rapid quantification of goat milk adulteration with cow milk using Raman spectroscopy and chemometrics. *Analytical Methods*, 15(4), 455–461. <https://doi.org/10.1039/d2ay01697d>
- Liao, J., Liu, Y. F., Ku, T., Liu, M. H., & Huang, Y. (2017). Qualitative and quantitative identification of adulteration of milk powder using DNA extracted with a novel method. *Journal of Dairy Science*, 100(3), 1657–1663. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11900>
- Mafra, I., Honrado, M., & Amaral, J. S. (2022). Animal species authentication in dairy products. *Foods*, 11(8), 1124. <https://doi.org/10.3390/foods11081124>
- Mane, B. G., Mendiratta, S. K., Tiwari, A. K., & Narayan, R. (2013). Sequence analysis of mitochondrial 16S rRNA gene to identify meat species. *Journal of Applied Animal Research*, 41(1), 77–81. <https://doi.org/10.1080/09712119.2012.738213>
- Markiewicz-Keszycka, M., Czyżak-Runowska, G., Lipińska, P., & Wójtowski, J. (2013). Fatty acid profile of milk: A review. *Bulletin of the Veterinary Institute in Pulawy*, 57, 135. <https://doi.org/10.2478/bvip-2013-0026>
- Osman, A. A., Mahmoud, A. M., & Soliman, A. S. (2014). Rapid detection of bovine-specific nucleic acid sequences in cow milk using polymerase chain reaction. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 3(3), 141–144. <https://doi.org/10.11648/j.jnfs.20140303.12>
- Perga, S., Biolatti, C., Martini, I., Rossi, F., Benso, A., Acutis, P. L., Bagnato, A., Cognata, D., Caroggio, P., Peletto, S., et al. (2023). Application of microsatellites to trace the dairy products back to the farm of origin. *Foods*, 12, 4131. <https://doi.org/10.3390/foods12224131>
- Poonia, A., Jha, A., Sharma, R., Singh, H. B., Rai, A. K., & Sharma, N. (2017). Detection of adulteration in milk: A review. *International Journal of Dairy Technology*, 70(1), 23–42. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12274>
- Reddy, D. M., Venkatesh, K., & Reddy, C. V. S. (2017). Adulteration of milk and its detection: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 5(4), 613–617.

- Rentsch, J., Weibel, S., Ruf, J., Eugster, A., Beck, K., & Köppel, R. (2013). Interlaboratory validation of two multiplex quantitative real-time PCR methods to determine species DNA of cow, sheep and goat as a measure of milk proportions in cheese. *European Food Research and Technology*, 236(1), 217–227. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1880-y>
- Ribani, A., Schiavo, G., Utzeri, V. J., Bertolini, F., Geraci, C., Bovo, S., & Fontanesi, L. (2018). Application of next generation semiconductor based sequencing for species identification in dairy products. *Food Chemistry*, 246, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.006>
- Sangthong, D., Suwannarat, S., Samipak, S., & Sangthong, P. (2021). Multiplex PCR assay for species identification of meat and dairy products from buffalo (*Bubalus bubalis*), cattle (*Bos indicus* and *Bos taurus*), goat (*Capra hircus*), and sheep (*Ovis aries*). *International Food Research Journal*, 28(4). <https://doi.org/10.47836/ifrj.28.4.08>
- Saviard, T., Deglaire, A., & Dupont, D. (2026). Seasonal variations in goat milk composition: A comprehensive review. *International Dairy Journal*, 176, 106569. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2026.106569>
- Seçkin, A. K., Yilmaz, B., & Tosun, H. (2017). Real-time PCR is a potential tool to determine the origin of milk used in cheese production. *LWT*, 77, 332–336. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.065>
- Tăbăran, A., Mihaiu, M., Dan, S. D., Reget, O., Pivariu, B., Cordiş, I., & Mureşan, C. (2014). Identification of polymorphism in goat and sheep DGAT1 gene associated with milk production traits. *Bulletin UASVM Veterinary Medicine*, 71(2), 281–286. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-vm:70:2:9325>
- Tortorici, L., Di Gerlando, R., Tolone, M., Mastrangelo, S., & Sardina, M. T. (2016). 12S rRNA mitochondrial gene as marker to trace Sicilian mono-species dairy products. *Livestock Science*, 193, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.09.015>
- Tsakali, E., Agkasta, C., Koliaki, C., Livanios, D., Boutris, G., Christopoulou, M. I., & Houhoula, D. (2019). Milk adulteration: Detection of bovine milk in caprine dairy products by real-time PCR. *Journal of Food Research*, 8(4), 52–57. <https://doi.org/10.5539/jfr.v8n4p52>
- Tsiplakou, E., Kotrotsios, V., Hadjigeorgiou, I., & Zervas, G. (2010). Differences in sheep and goats milk fatty acid profile between conventional and organic farming systems. *Journal of Dairy Research*, 77, 343–349. <https://doi.org/10.1017/S0022029910000270>
- Tsirigoti, E., Katsirma, Z., Papadopoulos, A. I., Samouris, G., Ekateriniadou, L. V., & Boukouvala, E. (2020). Application of triplex-PCR with an innovative combination of 3 pairs of primers for the detection of milk's animal origin in cheese and yoghurt. *Journal of Dairy Research*, 87(2), 239–242. <https://doi.org/10.1017/S0022029920000242>
- Tuncay, R. M. (2023). Detection of adulteration of goat milk sold in the Turkish market by real-time polymerase chain reaction. *German Journal of Veterinary Research*, 3(1), 18–23. <https://doi.org/10.51585/gjvr.2023.1.0048>
- Tuncay, R. M., & Sancak, Y. C. (2022). Comparison of PCR methods for determination of different types of milk added to goat milk. *Balikesir Sağlık Bilimleri Dergisi*, 11(3), 509–514. <https://doi.org/10.53424/balikesirsbd.1139179>
- Vafin, R. R., Galstyan, A. G., Tyulkin, S. V., Gilmanov, K. K., Yurova, E. A., Semipyatniy, V. K., & Bigaeva, A. V. (2022). Species identification of ruminant milk by genotyping of the κ-casein gene. *Journal of Dairy Science*, 105(2), 1004–1013. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19931>
- Wang, Y., Jing, L., Li, Z., Li, C., Lu, Z., & Liu, L. (2021). Fluorescence-based PCR detection of goat milk powder mixed with cow milk. *Asian Agricultural Research*, 13, 43–48. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.317691>
- Wang, Y., Yu, Z., & Liu, Y. (2022). A high sensitivity method of closed-tube loop-mediated isothermal amplification developed for visual and rapid detection of cow milk adulteration. *International Dairy Journal*, 127, 105214. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105214>
- Yadav, A. K., Gattupalli, M., Dashora, K., & Kumar, V. (2023). Key milk adulterants in India and their detection techniques: A review. *Food Analytical Methods*, 16(3), 499–514. <https://doi.org/10.1007/s12161-022-02427-8>
- Yu, W., Chen, Y., Wang, Z., Qiao, L., Xie, R., Zhang, J., & Chen, A. (2021). Multiple authentications of high-value milk by centrifugal microfluidic chip-based real-time fluorescent LAMP. *Food Chemistry*, 351, 129348. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129348>
- Zachar, P., Golian, J., Zaborska, D., Zacharová, A., & Mojžišová, J. (2011). Analytical methods for the species identification of milk and milk products. *Mljekarstvo*, 61(3), 199–207

- Zengin, Z. S., & Kara, R. (2022). Investigation of milk origin in sheep and goat cheese with real-time PCR. *Journal of Advances in VetBio Science and Techniques*, 7(2), 179–184. <https://doi.org/10.31797/vetbio.1057572>
- Zhang, X., Qiao, C., Fu, S., Jiao, Y., & Liu, Y. (2022). DNA-based qualitative and quantitative identification of bovine whey powder in goat dairy products. *Journal of Dairy Science*, 105(6), 4749–4759. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21618>

REFERENCES

- Abbas, O., Zadavec, M., Baeten, V., Mikuš, T., Lešić, T., Vulić, A., Prpić, J., Jemeršić, L., & Pleadin, J. (2018). Analytical methods used for the authentication of food of animal origin. *Food Chemistry*, 246, 6-17. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.007>
- Abedini, A., Salimi, M., Mazaheri, Y., Sadighara, P., Sani, M. A., Assadpour, E., & Jafari, S. M. (2023). Assessment of cheese frauds and relevant detection methods: A systematic review. *Food Chemistry X*, 100825. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100825>
- Agrimonti, C., Pirondini, A., Marmioli, M., & Marmioli, N. (2015). A quadruplex PCR (qPCR) assay for adulteration in dairy products. *Food Chemistry*, 187, 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.017>
- Agustina, Y., Mulyo, J., Waluyati, L., & Mazwan, M. (2021). Consumer preferences toward goat milk. *Agriecobis: Journal of Agricultural Socioeconomics and Business*, 4(2), 100-109. <https://doi.org/10.22219/agriecobis.v4i2.15922>
- Ait El Alia, O., Chaji, S., Boukrouh, S., Kaddouri, M., Zine-Eddine, Y., & Boutoia, K. (2026). Recent advances in the authentication of goat milk and its derived products. *Journal of Food Composition and Analysis*, 152, 109037. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2026.109037>
- Artuvan, E., & Aksay, S. (2022). In food safety control overview of using real-time PCR. *Biotech Studies*, 31(2), 53–60. <https://doi.org/10.38042/biotechstudies.1159145>
- Azad, T., & Ahmed, S. (2016). Common milk adulteration and their detection techniques. *International Journal of Food Contamination*, 3(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s40550-016-0045-3>
- Baptista, M., Cunha, J. T., & Domingues, L. (2021). DNA-based approaches for dairy products authentication: A review and perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 386-397. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.043>
- Bassi, C., Nuzzi, S., Pasinetti, S., Merlo, S., & Bello, V. (2026). Authenticity assessment of goat milk: Detecting dilution with cow milk by ML-enhanced speckle pattern imaging. *Acta IMEKO*, 15(1), 1–6. <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v15i1.2209>
- Böhme, K., Calo-Mata, P., Barros-Velázquez, J., & Ortea, I. (2019). Review of recent DNA-based methods for main food-authentication topics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(14), 3854–3864. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b07016>
- Bougadi, E. T., & Kalogianni, D. P. (2020). DNA-based biosensor for food authenticity testing. *Food Chemistry*, 322, 126758. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126758>
- Canja, C. M., Mazarel, A., Lupu, M. I., Padureanu, V., & Enache, D. V. (2016). Foodstuff falsification — a nowadays problem. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II*, 9(2), 69-74.
- Cavin, C., Cottenet, G., Blancpain, C., Bessaie, T., Frank, N., & Zbinden, P. (2016). Food adulteration: From vulnerability assessment to new analytical solutions. *Chimia*, 70(5), 329. <https://doi.org/10.2533/chimia.2016.329>
- Choopan, R., Thanakiatkrai, P., & Kitpipit, T. (2017). Simultaneous species identification in milk and dairy products using direct PCR. *Forensic Science International: Genetics Supplement Series*, 6, e214-e215. <https://doi.org/10.1016/j.fsigss.2017.09.077>
- Clark, S., & García, M. B. M. (2017). A 100-year review: Advances in goat milk research. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 10026-10044. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13287>

- Cosenza, G., Iannaccone, M., Gallo, D., & Pauciullo, A. (2019). A fast and reliable polymerase chain reaction method based on short interspersed nuclear elements detection for the discrimination of buffalo, cattle, goat, and sheep species in dairy products. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 32(6), 891. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0459>
- D'Angelo, F., Santillo, A., Sevi, A., & Albenzio, M. (2007). Technical note: A simple salting-out method for DNA extraction from milk somatic cells: Investigation into the goat CSN1S1 gene. *Journal of Dairy Science*, 90(7), 3550-3552. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0149>
- da Paixão Teixeira, J. L., dos Santos Caramês, E. T., Baptista, D. P., Gigante, M. L., & Pallone, J. A. L. (2021). Rapid adulteration detection of yogurt and cheese made from goat milk by vibrational spectroscopy and chemometric tools. *Journal of Food Composition and Analysis*, 96, 103712. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103712>
- da Silva Carvalho, A. C., Gennari, S. M., & Paschoalin, V. M. F. (2015). Consumption of animal products and frauds: DNA-based methods for the investigation of authenticity and traceability in dairy and meat-derived products — a review. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*, 52(3), 183–194. <https://doi.org/10.11606/issn.1678-4456.v52i3p183-194>
- Danezis, G. P., Tsagkaris, A. S., Camin, F., Brusica, V., & Georgiou, C. A. (2016). Food authentication: Techniques, trends and emerging approaches. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 85, 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.02.026>
- Deb, R., Sengar, G. S., Singh, U., Kumar, S., Raja, T. V., Alex, R., Alyethodi, R. R., & Prakash, B. (2017). LAMP assay for rapid diagnosis of cow DNA in goat milk and meat samples. *Iranian Journal of Veterinary Research*, 18(2), 134–137
- Demiati, D., Wahyuni, W., Rafi, M., & Putra, B. (2023). The detection of goat milk adulteration with cow milk using a combination of voltammetric fingerprints and chemometrics analysis. *Chemical Papers*, 77. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02780-w>
- Deng, L., Li, A., Gao, Y., Shen, T., Yue, H., Miao, J., Li, R., & Yang, J. (2020). Detection of the bovine milk adulterated in camel, horse, and goat milk using duplex PCR. *Food Analytical Methods*, 13, 560–567. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01678-2>
- Di Domenico, M., Di Giuseppe, M., Rodríguez, J. W., & Cammà, C. (2017). Validation of a fast real-time PCR method to detect fraud and mislabeling in milk and dairy products. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 106–112. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11695>
- Di Febo, T., Schirone, M., Di Domenico, M., Visciano, P., Krasteva, I., Sonsini, L., Cerquaglia, O., Carpino, S., D'Onofrio, F., Tittarelli, M., & Luciani, M. (2020). Detection of undeclared bovine milk in different food matrices by a multi-technique approach. *International Dairy Journal*, 111, 104845. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104845>
- Di Pinto, A., Terio, V., Marchetti, P., Bottaro, M., Mottola, A., Bozzo, G., Bonerba, E., Ceci, E., & Tantillo, G. (2017). DNA-based approach for species identification of goat-milk products. *Food Chemistry*, 229, 93-97. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.067>
- El Sheikh, A. F. (2019). DNAFoil: Novel technology for the rapid detection of food adulteration. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 544-552. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.11.012>
- Gallier, S., Tolenaars, L., & Prosser, C. (2020). Whole goat milk as a source of fat and milk fat globule membrane in infant formula. *Nutrients*, 12(11), 3486. <https://doi.org/10.3390/nu12113486>
- Gallinat, J. L., Qanbari, S., Drögemüller, C., Pimentel, E. C. G., Thaller, G., & Tetens, J. (2013). DNA-based identification of novel bovine casein gene variants. *Journal of Dairy Science*, 96(1), 699-709. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5908>
- Ganopoulos, I., Sakaridis, I., Argiriou, A., Madesis, P., & Tsaftaris, A. (2013). A novel closed-tube method based on high resolution melting (HRM) analysis for authenticity testing and quantitative detection in Greek PDO Feta cheese. *Food Chemistry*, 141(2), 835-840. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.130>
- Giglioti, R., Polli, H., Azevedo, B. T., Katiki, L. M., & Vercesi Filho, A. E. (2022). Detection and quantification of adulteration in milk and dairy products: A novel and sensitive qPCR-based method. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 4, 100074. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100074>
- Golinelli, L. P., Carvalho, A. C., Casaes, R. S., Lopes, C. S., Deliza, R., Paschoalin, V. M., & Silva, J. T. (2014). Sensory analysis and species-specific PCR detect bovine milk adulteration of frescal (fresh) goat cheese. *Journal of Dairy Science*, 97(11), 6693-6699. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-7990>

- Guo, L., Qian, J. P., Guo, Y. S., Hai, X., Liu, G. Q., Luo, J. X., & Ya, M. (2018). Simultaneous identification of bovine and equine DNA in milks and dairy products inferred from triplex TaqMan real-time PCR technique. *Journal of Dairy Science*, 101(8), 6776–6786. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14408>
- Guo, L., Ya, M., Hai, X., Guo, Y. S., Li, C. D., Xu, W. L., & Cai, Q. (2019). A simultaneous triplex TaqMan real-time PCR approach for authentication of caprine and bovine meat, milk and cheese. *International Dairy Journal*, 95, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.03.004>
- Guo, L., Yu, Y., Xu, W. L., Li, C. D., Liu, G. Q., Qi, L., & Guo, Y. S. (2020). Simultaneous detection of ovine and caprine DNA in meat and dairy products using triplex TaqMan real-time PCR. *Food Science & Nutrition*, 8(12), 6467–6476. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1936>
- Habza-Kowalska, E., Grela, M., Gryzinska, M., & Listos, P. (2019). Molecular techniques for detecting food adulteration. *Medycyna Weterynaryjna*, 75(7), 404–409. <https://doi.org/10.21521/mw.6261>
- Haddad, M., & Abu-Romman, S. (2020). PCR-based identification of bovine milk used in goat and sheep local dairy products marketed in Jordan. *EurAsian Journal of BioSciences*, 14(2), 5267–5272
- Hadeef, L., Hamad, B., & Bellabidi, M. (2024). A critical analysis of the impact of consumer attitudes and perception on goat milk consumption and influencing factors: consumer attitudes and perception towards goat milk. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 22. <https://doi.org/10.57239/PJLSS-2024-22.2.00262>
- Hazra, T., Sharma, V., Sharma, R., & Arora, S. (2017). A species specific simplex polymerase chain reaction-based approach for detection of goat tallow in heat clarified milk fat (ghee). *International Journal of Food Properties*, 20(Suppl. 1), S69–S75. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1289542>
- Hazra, T., Sharma, V., Sharma, R., & Arora, S. (2018). PCR based assay for the detection of cow milk adulteration in buffalo milk. *Indian Journal of Animal Research*, 52(3), 383–387. <https://doi.org/10.18805/ijar.11331>
- Hebert, P. D. N., Ratnasingham, S., & DeWaard, J. R. (2003). Barcoding animal life: Cytochrome c oxidase subunit 1 divergences among closely related species. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270, S96–S99.
- Hürkan, K., & Bulut, M. (2023). High resolution melting is a useful tool to detect animal species sources of various milk types. *Journal of Food Science and Technology*, 60(5), 1612–1620. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05705-3>
- Hurley, I. P., Coleman, R. C., Ireland, H. E., & Williams, J. H. H. (2004). Measurement of bovine IgG by indirect competitive ELISA as a means of detecting milk adulteration. *Journal of Dairy Science*, 87(3), 543–549. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73195-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73195-1)
- Kalogianni, D. P. (2018). DNA-based analytical methods for milk authentication. *European Food Research and Technology*, 244, 775–793. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-3016-x>
- Kang, T. S. (2019). Basic principles for developing real-time PCR methods used in food analysis: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 574–585. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.037>
- Kashani, A., & Malau-Aduli, A. E. O. (2014). Real-time PCR and real-time RT-PCR applications in food labelling and gene expression studies. *International Journal of Genetics and Genomics*, 2, 6–12
- Kastanos, E., Papaneophytou, C., Georgiou, T., & Demoliou, C. (2022). A simple and fast triplex-PCR for the identification of milk's animal origin in Halloumi cheese and yoghurt. *Journal of Dairy Research*, 89(3), 323–326. <https://doi.org/10.1017/S0022029922000577>
- Khanzadi, S., Jamshidi, A., Razmyar, J., & Mohsenzadeh, M. (2013). PCR-based detection of cow and goat milk in sheep milk and dairy products marketed in Mashhad city of Iran. *Iranian Journal of Veterinary Medicine*, 7(4), 257–262
- Kim, M. J., & Kim, H. Y. (2018). Direct duplex real-time loop mediated isothermal amplification assay for the simultaneous detection of cow and goat species origin of milk and yogurt products for field use. *Food Chemistry*, 246, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.014>
- Klančnik, A., Toplak, N., Kovač, M., Ogrinc, N., & Jeršek, B. (2016). Robust PCR-based method for quantification of bovine milk in cheeses made from caprine and ovine milk. *International Journal of Dairy Technology*, 69(4), 540–549. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12287>
- Lad, S. S., Aparnathi, K. D., Mehta, B., & Velpula, S. (2017). Goat milk in human nutrition and health: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(6), 1781–1792. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.605.194>

- Levieux, D., & Venien, A. (1994). Rapid, sensitive two-site ELISA for detection of cows' milk in goats' or ewes' milk using monoclonal antibodies. *Journal of Dairy Research*, 61(1), 91–99.
- Li, B., Yu, M., Xu, W., Chen, L., & Han, J. (2023). Comparison of PCR techniques in adulteration identification of dairy products. *Agriculture*, 13(7), 1450. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071450>
- Li, J. Y., Ge, Q., Liu, B., Gao, Z. P., & Guo, C. F. (2023). Quantification of cow milk in adulterated goat milk by HPLC-MS/MS using N-acetylglucosamine as a reliable biomarker of cow milk. *Journal of Food Composition and Analysis*, 123, 105583. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105583>
- Li, W., Huang, W., Fan, D., Gao, X., Zhang, X., Meng, Y., & Liu, T. C. (2023). Rapid quantification of goat milk adulteration with cow milk using Raman spectroscopy and chemometrics. *Analytical Methods*, 15(4), 455–461. <https://doi.org/10.1039/d2ay01697d>
- Liao, J., Liu, Y. F., Ku, T., Liu, M. H., & Huang, Y. (2017). Qualitative and quantitative identification of adulteration of milk powder using DNA extracted with a novel method. *Journal of Dairy Science*, 100(3), 1657–1663. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11900>
- Mafra, I., Honrado, M., & Amaral, J. S. (2022). Animal species authentication in dairy products. *Foods*, 11(8), 1124. <https://doi.org/10.3390/foods11081124>
- Mane, B. G., Mendiratta, S. K., Tiwari, A. K., & Narayan, R. (2013). Sequence analysis of mitochondrial 16S rRNA gene to identify meat species. *Journal of Applied Animal Research*, 41(1), 77–81. <https://doi.org/10.1080/09712119.2012.738213>
- Markiewicz-Keszycka, M., Czyżak-Runowska, G., Lipińska, P., & Wójtowski, J. (2013). Fatty acid profile of milk: A review. *Bulletin of the Veterinary Institute in Pulawy*, 57, 135. <https://doi.org/10.2478/bvip-2013-0026>
- Osman, A. A., Mahmoud, A. M., & Soliman, A. S. (2014). Rapid detection of bovine-specific nucleic acid sequences in cow milk using polymerase chain reaction. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 3(3), 141–144. <https://doi.org/10.11648/j.ijnfs.20140303.12>
- Perga, S., Biolatti, C., Martini, I., Rossi, F., Benso, A., Acutis, P. L., Bagnato, A., Cognata, D., Caroggio, P., Peletto, S., et al. (2023). Application of microsatellites to trace the dairy products back to the farm of origin. *Foods*, 12, 4131. <https://doi.org/10.3390/foods12224131>
- Poonia, A., Jha, A., Sharma, R., Singh, H. B., Rai, A. K., & Sharma, N. (2017). Detection of adulteration in milk: A review. *International Journal of Dairy Technology*, 70(1), 23–42. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12274>
- Reddy, D. M., Venkatesh, K., & Reddy, C. V. S. (2017). Adulteration of milk and its detection: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 5(4), 613–617.
- Rentsch, J., Weibel, S., Ruf, J., Eugster, A., Beck, K., & Köppel, R. (2013). Interlaboratory validation of two multiplex quantitative real-time PCR methods to determine species DNA of cow, sheep and goat as a measure of milk proportions in cheese. *European Food Research and Technology*, 236(1), 217–227. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1880-y>
- Ribani, A., Schiavo, G., Utzeri, V. J., Bertolini, F., Geraci, C., Bovo, S., & Fontanesi, L. (2018). Application of next generation semiconductor based sequencing for species identification in dairy products. *Food Chemistry*, 246, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.006>
- Sangthong, D., Suwannarat, S., Samipak, S., & Sangthong, P. (2021). Multiplex PCR assay for species identification of meat and dairy products from buffalo (*Bubalus bubalis*), cattle (*Bos indicus* and *Bos taurus*), goat (*Capra hircus*), and sheep (*Ovis aries*). *International Food Research Journal*, 28(4). <https://doi.org/10.47836/ifrj.28.4.08>
- Saviard, T., Deglaire, A., & Dupont, D. (2026). Seasonal variations in goat milk composition: A comprehensive review. *International Dairy Journal*, 176, 106569. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2026.106569>
- Seçkin, A. K., Yilmaz, B., & Tosun, H. (2017). Real-time PCR is a potential tool to determine the origin of milk used in cheese production. *LWT*, 77, 332–336. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.065>
- Tăbăran, A., Mihaiu, M., Dan, S. D., Reget, O., Pivariu, B., Cordiş, I., & Mureşan, C. (2014). Identification of polymorphism in goat and sheep DGAT1 gene associated with milk production traits. *Bulletin UASVM Veterinary Medicine*, 71(2), 281–286. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-vm:70:2:9325>

- Tortorici, L., Di Gerlando, R., Tolone, M., Mastrangelo, S., & Sardina, M. T. (2016). 12S rRNA mitochondrial gene as marker to trace Sicilian mono-species dairy products. *Livestock Science*, 193, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.09.015>
- Tsakali, E., Agkasta, C., Koliaki, C., Livanios, D., Boutris, G., Christopoulou, M. I., & Houhoula, D. (2019). Milk adulteration: Detection of bovine milk in caprine dairy products by real-time PCR. *Journal of Food Research*, 8(4), 52–57. <https://doi.org/10.5539/jfr.v8n4p52>
- Tsiplakou, E., Kotrotsios, V., Hadjigeorgiou, I., & Zervas, G. (2010). Differences in sheep and goats milk fatty acid profile between conventional and organic farming systems. *Journal of Dairy Research*, 77, 343–349. <https://doi.org/10.1017/S0022029910000270>
- Tsirigoti, E., Katsirma, Z., Papadopoulos, A. I., Samouris, G., Ekateriniadou, L. V., & Boukouvala, E. (2020). Application of triplex-PCR with an innovative combination of 3 pairs of primers for the detection of milk's animal origin in cheese and yoghurt. *Journal of Dairy Research*, 87(2), 239–242. <https://doi.org/10.1017/S0022029920000242>
- Tuncay, R. M. (2023). Detection of adulteration of goat milk sold in the Turkish market by real-time polymerase chain reaction. *German Journal of Veterinary Research*, 3(1), 18–23. <https://doi.org/10.51585/gjvr.2023.1.0048>
- Tuncay, R. M., & Sancak, Y. C. (2022). Comparison of PCR methods for determination of different types of milk added to goat milk. *Balikesir Sağlık Bilimleri Dergisi*, 11(3), 509–514. <https://doi.org/10.53424/balikesirsbd.1139179>
- Vafin, R. R., Galstyan, A. G., Tyulkin, S. V., Gilmanov, K. K., Yurova, E. A., Semipyatniy, V. K., & Bigaeva, A. V. (2022). Species identification of ruminant milk by genotyping of the κ -casein gene. *Journal of Dairy Science*, 105(2), 1004–1013. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19931>
- Wang, Y., Jing, L., Li, Z., Li, C., Lu, Z., & Liu, L. (2021). Fluorescence-based PCR detection of goat milk powder mixed with cow milk. *Asian Agricultural Research*, 13, 43–48. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.317691>
- Wang, Y., Yu, Z., & Liu, Y. (2022). A high sensitivity method of closed-tube loop-mediated isothermal amplification developed for visual and rapid detection of cow milk adulteration. *International Dairy Journal*, 127, 105214. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105214>
- Yadav, A. K., Gattupalli, M., Dashora, K., & Kumar, V. (2023). Key milk adulterants in India and their detection techniques: A review. *Food Analytical Methods*, 16(3), 499–514. <https://doi.org/10.1007/s12161-022-02427-8>
- Yu, W., Chen, Y., Wang, Z., Qiao, L., Xie, R., Zhang, J., & Chen, A. (2021). Multiple authentications of high-value milk by centrifugal microfluidic chip-based real-time fluorescent LAMP. *Food Chemistry*, 351, 129348. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129348>
- Zachar, P., Golian, J., Zaborska, D., Zacharová, A., & Mojžišová, J. (2011). Analytical methods for the species identification of milk and milk products. *Mljekarstvo*, 61(3), 199–207
- Zhizhin N. A. (2020). Evaluation of the fatty acid composition of cow's and goat's milk from the perspective of its functional impact on the human body. *Collection of scientific papers of VNIMI*, 181–186. (in Russ.). <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-181-186>
- Zengin, Z. S., & Kara, R. (2022). Investigation of milk origin in sheep and goat cheese with real-time PCR. *Journal of Advances in VetBio Science and Techniques*, 7(2), 179–184. <https://doi.org/10.31797/vetbio.1057572>
- Zhang, X., Qiao, C., Fu, S., Jiao, Y., & Liu, Y. (2022). DNA-based qualitative and quantitative identification of bovine whey powder in goat dairy products. *Journal of Dairy Science*, 105(6), 4749–4759. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21618>

ОБ АВТОРАХ

Хан Алексей Владимирович, 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/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

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

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

Khan Alexey Vladimirovich, 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/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

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

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