



FOOD METAENGINEERING

Пищевая Метаинженерия

Volume 3 | Issue 2 | 2025



■ FOOD METAENGINEERING

Научный рецензируемый журнал
No 2 | 2025
Периодичность издания — 4 номера в год
Основан в 2023 г.

■ Учредитель:

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

■ Главный редактор

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

■ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Заведующий редакцией журнала, академический редактор

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

Ответственный секретарь

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

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

Редактор по этике

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

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

■ Адрес:

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

© ФГАНУ «ВНИМИ», 2025

■ FOOD METAENGINEERING

Scientific peer-reviewed journal
No 2 | 2025
Periodicity of publication — Quarterly
Published since 2023

■ Founder:

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

■ Editor-in-Chief

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

■ EDITORIAL OFFICE

Head of the Editorial Team, Academic Editor

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

Executive Secretary

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

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

Ethics Editor

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

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

■ Address:

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

© VNIMI, 2025

- **Абжанова Шолпан Аманкелдыкызы** —
доцент, кандидат технических наук, заведующая
кафедрой "Пищевая биотехнология" Алматинского
технологического университета, г. Алма-Ата,
Республика Казахстан
- **Асембаева Эльмира Куандыковна** —
PhD, ассоциированный профессор кафедры "Пищевая
биотехнология" Алматинского технологического
университета, г. Алма-Ата, Республика Казахстан
- **Бабич Ольга Олеговна** —
доцент, доктор технических наук, директор
Научно-образовательного центра «Промышленные
биотехнологии» Балтийского федерального
университета имени Иммануила Канта», г. Калининград,
Российская Федерация
- **Багиров Вугар Алинияз оглы** —
член-корреспондент РАН, профессор, доктор
биологических наук, Федеральный исследовательский
центр животноводства — ВИЖ им. акад. Л.К. Эрнста,
г. Подольск, Российская Федерация
- **Донник Ирина Михайловна** —
академик РАН, профессор, доктор биологических наук,
профессор Уральского государственного аграрного
университета, г. Екатеринбург, Российская Федерация
- **Евдокимов Иван Алексеевич** —
член-корреспондент РАН, профессор, доктор
технических наук, заведующий базовой кафедрой
технологии молока и молочных продуктов Северо-
Кавказского федерального университета, г. Ставрополь,
Российская Федерация
- **Кистаубаева Аида Сериковна** — 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 Institut,
Moscow, Russian Federation
- **Irina M. Chernukha** —
Academician of the Russian Academy
of Sciences, Professor, Doctor of Technical Sciences,
Head of Department, Chief Researcher, Federal Research
Center for Food Systems named after V. M. Gorbato, V.
Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

РЕДАКТОРСКАЯ СТАТЬЯ

А.Е. Рябова

О необходимости использования корпоративного электронного адреса при подаче рукописи:
редакционная позиция..... 7

ОРИГИНАЛЬНОЕ ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Н.А. Есаулко, М.В. Селиванова, Д.С. Соломатин, Е.С. Романенко, Е.А. Миронова, М.С. Новак

Безглютеновые хлебобулочные изделия из пророщенного амаранта:
применение экстракта виноградной косточки и частичной дегидратации в функциональной рецептуре..... 11

ОРИГИНАЛЬНОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

О.И. Лаврухина, Д.А. Макаров, Е.С. Козеичева, Т.В. Балагула, А.В. Третьяков, М.А. Гергель, Е.А. Лозовая

Химические загрязнители готовой продукции: контроль и снижение уровней контаминации:
обзор предметного поля..... 27

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

И.Р. Соколов, В.М. Нсанова, В.М. Виноградов, М.С. Каночкина

Механизмы усиления синтеза бактериоцинов представителями семейства *Lactobacillaceae*:
обзор предметного поля..... 79

Е.И. Большакова, Наташа Поклар Ульрих

Молочная сыворотка в 3DP: обзор предметного поля..... 106

EDITORIAL

Anastasia E. Ryabova

On the Use of Institutional Email Addresses When Submitting a Manuscript: An Editorial Perspective..... 8

ORIGINAL EMPIRICAL RESEARCH

**Natalia A. Esaulko, Maria V. Selivanova, Danil S. Solomatin, Elena S. Romanenko,
Elena A. Mironova, Maria S. Novak**

Gluten-free baked goods made from sprouted amaranth:
the use of grape seed extract and partial dehydration in a functional recipe.....12

ORIGINAL THEORETICAL RESEARCH

**Olga I. Lavrukhina, Dmitry A. Makarov, Elizaveta S. Kozeicheva, Tatiana V. Balagula, Alexey V. Tretyakov,
Maria A. Gergel, Evgeniya A. Lozovaya**

Chemical Contaminants in Ready-to-Eat Food Products: Control and Contamination Mitigation:
A Scoping Review28

SCOPING REVIEW

Ilya R. Sokolov, Viktoria M. Nsanova, Maksim V. Vinogradov, Maria S. Kanochkina

Mechanisms of Enhancing Bacteriocin Synthesis by Members of the *Lactobacillaceae*: A Scoping Review80

Ekaterina I. Bolshakova, Natasha Poklar Ulrich

Whey in 3D Printing: A Scoping Review107

О необходимости использования корпоративного электронного адреса при подаче рукописи: редакционная позиция

А.Е. Рябова

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

АННОТАЦИЯ

В редакционной статье обосновывается необходимость указания корпоративного электронного адреса при подаче рукописи в научный журнал. Подчеркивается, что такая практика способствует верификации аффилиации автора, укреплению прозрачности публикационного процесса и повышению доверия к опубликованным исследованиям. Редакция обращает внимание на допустимые исключения, но акцентирует, что для авторов, официально аффилированных с научными учреждениями, использование корпоративной почты является обязательным условием.

Ключевые слова: верификация авторства; корпоративный email; аффилиация автора; научная добросовестность; идентификация исследователя; редакционная политика

Корреспонденция:

А.Е. Рябова

E-mail: a_ryabova@vnimi.org

Конфликт интересов:

автор сообщает
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 09.05.2025

Принята: 15.06.2025

Опубликована: 30.06.2025

Copyright: © 2025 Автор



Для цитирования: Рябова, А.Е. (2025). О необходимости использования корпоративного электронного адреса при подаче рукописи: редакционная позиция. *FOOD METAENGINEERING*, 3(2), 7–10. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.83>

<https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.83>

On the Use of Institutional Email Addresses When Submitting a Manuscript: An Editorial Perspective

Anastasia E. Ryabova

All-Russian Dairy Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

This editorial outlines the rationale for requiring authors to provide an institutional email address when submitting a manuscript to a scholarly journal. It highlights the role of institutional emails in verifying authorship and affiliation, enhancing the transparency of the editorial process, and fostering greater trust in published research. While the editorial acknowledges that exceptions may apply in certain cases, it emphasizes that the use of a verified institutional address is a mandatory requirement for authors formally affiliated with academic or research institutions.

Keywords: authorship verification; institutional email; author affiliation; research integrity; researcher identification; editorial policy

Correspondence:

A. E. Ryabova

E-mail: a_ryabova@vnimi.org

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 09.05.2025

Accepted: 15.06.2025

Published: 31.06.2025

Copyright: © 2025 The Author



To cite: Ryabova, A.E. (2025). On the use of institutional email addresses when submitting a manuscript: An editorial perspective. *FOOD METAENGINEERING*, 3(2), 7–10. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.83>

В последние годы научное сообщество все чаще сталкивается с вызовами, связанными с обеспечением достоверности авторства, институциональной принадлежности и исследовательской добросовестности. На этом фоне особую значимость приобретают механизмы, позволяющие редакциям журналов оперативно и надёжно верифицировать участников публикационного процесса (Shen et al., 2018). Одним из таких механизмов выступает требование редакции указывать корпоративный (институциональный) адрес электронной почты при подаче рукописи.

Практика, при которой авторы представляют исключительно личные email-адреса (в доменах общедоступных почтовых сервисов), усложняет процесс подтверждения их аффилиации, а в ряде случаев становится препятствием для оперативного реагирования на нарушения публикационной этики (Тихонова & Косычева, 2024). Корпоративный электронный адрес, напротив, обеспечивает проверяемую связь автора с заявленным научным учреждением и служит дополнительной гарантией его действительной принадлежности к академическому или исследовательскому сообществу.

Для редакции использование корпоративного email-адреса — не формальность, а важный инструмент:

- (1) он способствует подтверждению заявленной аффилиации и снижает риски фиктивного авторства;
- (2) позволяет обеспечить прозрачность коммуникации в процессе рецензирования и редакционной работы, включая возможные запросы по этическим, методологическим или юридическим вопросам;
- (3) укрепляет доверие читательской аудитории к опубликованным статьям, поскольку институциональная подотчётность автора сегодня рассматривается как неотъемлемая часть академической ответственности.

Редакция осознает, что не все участники научного процесса в равной степени обеспечены постоянным доступом к корпоративной почте. В частности, не имеют к ней доступа независимые исследователи, исследователи, прекратившие работать по найму или вышедшие на пенсию, или привлекаемые к работе над конкретными проектами специалисты. В подобных случаях допускается использование личного email при условии, что автор при необходимости готов предоставить подтверждение своей научной аффилиации. Однако в отношении сотрудников университетов, НИИ и иных организаций, предоставляющих официальные каналы связи, указание корпоративного адреса рассматривается как обязательное (Teixeira da Silva, 2021).

Редакционная коллегия оставляет за собой право запрашивать дополнительные подтверждающие документы, если сведения об авторе вызывают сомнения. Обращаем внимание, что отсутствие корпоративного адреса в заявке, особенно при наличии формальной аффилиации, может быть расценено как фактор, препятствующий рассмотрению рукописи.

Мы призываем авторов учитывать не только технические, но и репутационные аспекты представления своих данных. Ответственный подход к оформлению информации об авторе — важное условие поддержания академических стандартов и доверия к научной публикации как таковой.

ЛИТЕРАТУРА

- Тихонова, Е.В., & Косычева, М.А. (2024). Институциональный адрес электронной почты автора научной статьи: стандарт доверия в академической среде и инструмент редакции. *Health, Food & Biotechnology*, 6(3), 6–10. <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i3.s249>
- Shen, S., Rousseau, R., Wang, D. (2018). Do papers with an institutional e-mail address receive more citations than those with a non-institutional one". *Scientometrics*, 115(2), 1039–1050. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2691-0>
- Teixeira da Silva, J. A. (2021). Are mandatory institutional emails for manuscript submission an unfair and discriminatory policy?. *Journal of Interdisciplinary Medicine*, 6(4), 189–191. <https://doi.org/10.2478/jim-2021-0039>

REFERENCES

- Tikhonova, E.V., & Kosycheva, M.A. (2024). Institutional email address of the author of a research article: A benchmark for trust in academia and a tool for editors. *Health, Food & Biotechnology*, 6(3), 6–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i3.s249>
- Shen, S., Rousseau, R., Wang, D. (2018). Do papers with an institutional e-mail address receive more citations than those with a non-institutional one". *Scientometrics*, 115(2), 1039–1050. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2691-0>
- Teixeira da Silva, J. A. (2021). Are mandatory institutional emails for manuscript submission an unfair and discriminatory policy?. *Journal of Interdisciplinary Medicine*, 6(4), 189–191. <https://doi.org/10.2478/jim-2021-0039>

ОБ АВТОРЕ

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

AUTHOR INFORMATION

Ryabova Anastasia Evgenievna, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Education, Senior Research Scientist, Laboratory of Biotransformation and Preservation Technologies, 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

Безглютеновые хлебобулочные изделия из пророщенного амаранта: применение экстракта виноградной косточки и частичной дегидратации в функциональной рецептуре

Н.А. Есаулко, М.В. Селиванова, Д.С. Соломатин, Е.С. Романенко, Е.А. Миронова, М.С. Новак

Ставропольский государственный аграрный университет,
г. Ставрополь, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Рост числа пациентов с целиакией и распространение тенденций здорового питания формируют устойчивый спрос на безглютеновую продукцию. В условиях импортозамещения особую актуальность приобретает разработка хлебобулочных изделий на основе локального растительного сырья. Амарант (*Amaranthus cruentus* L.) обладает высоким содержанием белка, сквалена и биологически активных веществ, но его применение осложняется отсутствием клейковины. Совмещение амаранта с экстрактом виноградной косточки (*Vitis vinifera*) и технологией частичной дегидратации позволяет компенсировать структурные недостатки и повысить функциональную ценность продукции.

Цель: Разработка и экспериментальная проверка технологии безглютеновых хлебобулочных изделий на основе пророщенного амаранта с применением экстракта виноградной косточки и частичной дегидратации, направленной на повышение пищевой ценности, улучшение текстурных характеристик и увеличение доступности профилактической продукции для лиц с целиакией и потребителей функционального питания.

Материалы и методы: В исследовании использовались семена амаранта сорта «Каракула» (урожай 2023 г.), экстракт виноградной косточки (серия GSE 95 %), вспомогательные ингредиенты (гречневая и рисовая мука, яблоко), а также очищенная вода. Органолептический анализ проводился согласно ГОСТ 5667-2022 с привлечением дегустационной комиссии. Физико-химические показатели (влажность, кислотность, пористость, содержание глютена) определялись по ГОСТ 34835-2022.

Результаты: Разработанная рецептура продемонстрировала высокую пористость (72 %), сбалансированную кислотность (2,8°), оптимальную влажность (47,2 %) и отсутствие глютена (<1 мг/кг), что подтверждает пригодность продукции для диеты при целиакии. Технология обеспечивает сохранность биоактивных компонентов, улучшает структурные характеристики изделий и увеличивает срок хранения. Экономическая эффективность достигается за счёт локального сырья и энергощадящего режима дегидратации.

Выводы: Предложенная технология представляет собой эффективное решение задач безглютенового хлебопечения, обеспечивая улучшенные органолептические и физико-химические свойства, высокую пищевую ценность и доступность продукта. Дальнейшие исследования предполагают масштабирование технологии, расширение ассортимента и клиническую валидацию нутрицевтического эффекта.

Ключевые слова: безглютеновые хлебобулочные изделия; амарантовая мука; целиакия; экстракт виноградной косточки; частичная дегидратация; функциональное питание; пророщенные зерновые культуры; антиоксидантные добавки в хлебопечении; растительное сырьё в хлебопечении

Корреспонденция:

Есаулко Наталья
Александровна
E-mail: esaulko70@mail.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 20.01.2025

Принята: 15.06.2025

Опубликована: 30.06.2025

Финансирование:

Фонд содействия инновациям

Copyright: © 2025 Авторы



Для цитирования: Есаулко, Н.А., Селиванова, М.В., Соломатин, Д.С., Романенко, Е.С., Миронова, Е.А., & Новак, М.С. (2025). Безглютеновые хлебобулочные изделия из пророщенного амаранта: применение экстракта виноградной косточки и частичной дегидратации в функциональной рецептуре. *FOOD METAENGINEERING*, 3(2), 11–26. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.84>

Gluten-free baked goods made from sprouted amaranth: the use of grape seed extract and partial dehydration in a functional recipe

Natalia A. Esaulko, Maria V. Selivanova, Danil S. Solomatin, Elena S. Romanenko, Elena A. Mironova, Maria S. Novak

Stavropol State Agrarian University,
Stavropol, Russian Federation

ABSTRACT

Background: The growing prevalence of celiac disease and the global shift toward health-conscious eating are driving sustained demand for gluten-free baked goods. In the context of import substitution, the development of bakery products based on locally sourced plant materials is gaining particular relevance. *Amaranthus cruentus* L. is rich in protein, squalene, and biologically active compounds, yet its use is limited by the absence of gluten. Combining amaranth with *Vitis vinifera* seed extract and partial dehydration technology helps compensate for structural deficiencies and enhances the functional value of the final product.

Purpose: To develop and experimentally validate a gluten-free bakery technology based on germinated amaranth, incorporating grape seed extract and partial dehydration, aimed at improving nutritional value, enhancing textural properties, and increasing accessibility of preventive nutrition for individuals with celiac disease and consumers of functional foods.

Materials and Methods: The study employed *Amaranthus cruentus* seeds ('Karakula' cultivar, 2023 harvest), grape seed extract (GSE 95 % series), supporting ingredients (buckwheat and brown rice flour, apple), and purified water. Sensory evaluation was conducted according to GOST 5667-2022 using a tasting panel. Physicochemical parameters (moisture content, acidity, porosity, and gluten content) were determined according to GOST 34835-2022.

Results: The developed formulation demonstrated high porosity (72 %), balanced acidity (2.8°), optimal moisture content (47.2 %), and complete gluten absence (<1 mg/kg), confirming the product's suitability for gluten-free diets. The proposed technology preserves bioactive components, improves structural properties, and extends shelf life. Economic feasibility is achieved through the use of local raw materials and energy-efficient dehydration processes.

Conclusion: The proposed technology offers an effective solution to the challenges of gluten-free baking by delivering improved sensory and physicochemical characteristics, high nutritional value, and enhanced product accessibility. Further research will focus on scaling production, diversifying product lines, and clinically validating the nutraceutical effect.

Keywords: gluten-free baked goods; amaranth flour; celiac disease; grape seed extract; partial dehydration; functional nutrition; germinated grains; antioxidant additives in baking; plant-based baking ingredients

Correspondence:

Natalia A. Esaulko

E-mail: esaulko70@mail.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 20.01.2025

Accepted: 15.06.2025

Published: 30.06.2025

Funding:

Innovation Promotion Fund.

Copyright: © 2025 The Authors



To cite: Esaulko, N.A., Selivanova, M.V., Solomatin, D.S., Romanenko, E.S., Mironova, E.A., & Novak, M.S. (2025). Gluten-free baked goods made from sprouted amaranth: The use of grape seed extract and partial dehydration in a functional recipe. *FOOD METAENGINEERING*, 3(2), 11–26. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.84>

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на устойчивый рост глобального и российского рынка безглютеновой продукции, качество и доступность этих изделий остаются предметом научной и практической обеспокоенности, особенно в регионах с ограниченными логистическими и производственными ресурсами (Щербакова & Кузнецова, 2022). Проблема обостряется на фоне увеличения числа пациентов с целиакией — хроническим аутоиммунным заболеванием, полностью исключая употребление глютена (Тлиф и соавт., 2012). Согласно данным Lohi et al. (2007), распространенность целиакии в Европе и России составляет в среднем 1–2%, а генетическую предрасположенность имеют до 15% населения (Savvateeva, 2017; Попов и соавт., 2024). В последнее время амарант стал объектом растущего научного и промышленного интереса. Это связано с его ценными биологическими свойствами, богатым фитохимическим составом и широкой фармакологической активностью (Бараняк & Добровольска, 2022). Хотя производство амаранта официально не регистрируется Организацией ООН по продовольствию и сельскому хозяйству (ФАО), основными производителями являются несколько стран Южной Америки, а также Китай, Индия, Россия и Кения (Aderibigbe et al., 2022). В ряде регионов России, включая Ставропольский край, наблюдается устойчивый рост заболеваемости среди детского населения (Черкасова, 2024), что требует расширения ассортимента доступной и безопасной безглютеновой продукции, в том числе профилактического назначения.

В этом контексте повышенный научный интерес вызывает амарант (*Amaranthus spp.*) — зерновая культура, не содержащая глютена, обладающая высокой пищевой ценностью и богатая биологически активными веществами, включая сквален, лизин и пищевые волокна (Zannini et al., 2022; Meena et al., 2022). Благодаря множеству агрономических и питательных свойств амарант в последнее время набирает популярность (Oprea et al., 2022). Поскольку известно, что это засухоустойчивая культура, она может расти в различных климатических и экологических условиях. По сравнению с другими основными зерновыми культурами, такими как кукуруза, пшеница и сорго, амарант содержит больше белка (14,0–15,5%), меньше жира (7,5%), больше углеводов (60–68%) и меньше золы (2,5–3,1%) (Aderibigbe et al., 2022). Применение амарантовой муки позволяет существенно увеличить содержание белка и микронутриентов в хлебобулочных

изделиях, однако технологические свойства этой культуры ограничены отсутствием клейковины, что ведет к сниженной эластичности теста и ухудшенной структуре мякиша (Yano, 2020; Peñalver et al., 2024).

Среди возможных решений этой проблемы — использование растительных экстрактов с функциональной активностью, в частности экстракта виноградной косточки (*Vitis vinifera*), богатого проантоцианидинами и способного улучшать структурные и реологические характеристики теста за счёт взаимодействия полифенолов с белками и крахмалами (Schoenlechner et al., 2010; Быкова и соавт., 2018). Дополнительным технологическим приёмом, способствующим сохранению биоактивных веществ и улучшению технологических свойств сырья, может выступать частичная дегидратация при щадящих температурных режимах (Волкова, 2023).

Несмотря на наличие отдельных исследований, посвящённых амаранту, экстрактам виноградной косточки и технологиям сушки, до настоящего времени не представлено комплексных решений, интегрирующих указанные компоненты в единую технологическую платформу, ориентированную на производство безглютеновой продукции с повышенной пищевой ценностью и адаптивной структурой. Мука из амаранта и экстракт виноградной косточки — успешные кандидаты для улучшения качества безглютеновых изделий (Yalcin et al., 2022). Результаты этого исследования дают полезную информацию и могут способствовать разработке новых безглютеновых хлебобулочных продуктов.

Целью настоящего исследования является разработка рецептуры безглютеновых хлебобулочных изделий профилактической направленности на основе пророщенного амаранта, с применением экстракта виноградной косточки и частичной дегидратации с хорошими органолептическими и физико-химическими характеристиками полученной продукции. Поскольку число людей с целиакией растёт, такие высококачественные продукты становятся всё более востребованными.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Биологические и технологические свойства амаранта

Амарант (*Amaranthus spp.*) представляет собой ценное безглютеновое сырьё, обладающее высоким содержанием полноценного белка (до 18%) и уникальным

аминокислотным составом с высоким уровнем лизина (до 6 %) (Никитин, 2005; Zannini et al., 2022). Кроме того, в составе семян амаранта обнаружены биологически активные соединения, включая сквален, витамины группы В, пищевые волокна и минералы (Тохтиева, 2022). Сквален, как липофильный антиоксидант, участвует в защите клеточных мембран и регулирует липидный обмен, что повышает нутрицевтическую значимость продукции. Семена амаранта обладают очень высокой питательной ценностью. Наиболее важным продуктом из амаранта является зерно, которое используется в качестве муки в хлебопекарной промышленности. Амарантовая мука идеально подходит для приготовления питательных продуктов (безглютеновых) для тех, кто чувствителен к глютену, благодаря отсутствию в ней глютена. Благодаря высокому содержанию белка амарант можно использовать отдельно или в качестве пищевой добавки в смесях на основе злаков (Alvarez-Jubete et al., 2010; Ahmed et al. 2022).

Зёрна амаранта — это псевдозлаки, не содержащие глютен, которые набирают популярность благодаря высокому содержанию жизненно важных питательных веществ и биологически активных компонентов, потенциальной пользе для здоровья, устойчивости к неблагоприятным климатическим и почвенным условиям, минимальным требованиям к сельскохозяйственным ресурсам, возможности получения дохода для мелких фермеров, а также различным сферам применения в рамках устойчивой цепочки создания стоимости. Однако из-за недостаточной осведомлённости потребителей, исследователей и политиков об этих потенциальных преимуществах зёрен амаранта они остаются невостребованными (Kaur et al., 2024). Поскольку число людей с целиакией растёт, такие высококачественные продукты становятся всё более востребованными.

Хлопья, мука, каша и масло — наиболее распространённые продукты, получаемые из семян амаранта. Благодаря высокому содержанию белка амарант можно использовать отдельно или в качестве добавки к злаковым смесям (Balakrishnan & Schneider, 2022). Амарант уже используется в качестве новой эффективной альтернативы при производстве функционального печенья. Метод заключается в частичной замене цельнозерновой муки на муку из амаранта (Siddiqui et al., 2022). Глютен, белковая фракция, получаемая из пшеницы, ржи, ячменя, овса, их гибридов и производных, очень важен в технологии выпечки. Число людей, страдаю-

щих непереносимостью глютена, растёт во всём мире, и в то же время увеличивается потребность в продуктах, подходящих для безглютеновой диеты. Хлеб и хлебобулочные изделия являются неотъемлемой частью ежедневного рациона. Поэтому ведутся поиски новых натуральных безглютеновых ингредиентов для выпечки и новых способов обработки традиционных ингредиентов (Šmídová & Rysová, 2022; Иванова, 2025).

Тем не менее, технологические свойства амаранта ограничены отсутствием глютена. Безглютеновое тесто из амарантовой муки характеризуется слабой газоудерживающей способностью, высокой плотностью и низкой эластичностью, что затрудняет формирование изделий с традиционными потребительскими характеристиками (Yano, 2020). Проблема может быть частично решена путем ферментации или введения функциональных добавок.

Применение экстракта виноградной косточки

Экстракт виноградной косточки (*Vitis vinifera*) богат полифенолами, включая проантоцианидины, флавоноиды и витамин Е, которые обладают высокой антиоксидантной активностью (Федянина и соавт., 2017). Эти компоненты способны взаимодействовать с белками и крахмалом в тесте, улучшая его структуру, повышая водоудерживающую способность и стабилизируя мякиш. Исследования показали, что косточки винограда обладают широким спектром фармакологических свойств против окислительного стресса. Их потенциальная польза включает защиту от окислительного повреждения, антидиабетические, антихолестериновые, антитромбоцитарные и антимикробные функции. Признание таких преимуществ проантоцианидинов для здоровья привело к использованию виноградных косточек и продуктов их переработки в качестве пищевой добавки для различных групп потребителей (Морозова, 2021, Пономарев с соавт., 2024). Виноградные косточки, отходы винодельческой промышленности и производства виноградного сока, содержат большое количество фенольных соединений и, как было подтверждено в ряде исследований, чрезмерно полезны для здоровья. Из общего количества фенольных соединений в винограде 10 % или менее содержится в мякоти, 30 % — в кожце винограда, а оставшиеся 60 % — в косточках. Поскольку виноградные косточки содержат большое количество фенольных соединений,

в последние годы широкое распространение получило использование виноградных продуктов в форме капсул в качестве пищевых добавок. Кроме того, антиоксиданты растительного происхождения способствуют увеличению срока хранения продукции и обеспечивают профилактический эффект, особенно в составе диетических хлебобулочных изделий (Eduardo et al., 2024). В процессе ферментации тесто становится более упорядоченным, в то время как в белом хлебе во время ферментации существенных изменений не наблюдается (Растительные экстракты также положительно влияют на ферментацию теста, как показано в исследовании, где экстракт виноградной косточки усилил проращивание зерна и ферментативную активность (Yalcin et al., 2022, Пономарев и соавт., 2024).

Методы дегидратации и их влияние на биодоступность нутриентов

Частичная дегидратация при пониженных температурах (60–65 °C) позволяет сохранить термолабильные биологически активные вещества, включая витамины, полифенолы и сквален, что подтверждено исследованиями. Низкотемпературная сушка также способствует улучшению технологических свойств зерна, включая его растворимость и водопоглощаемость, что важно для производства функциональных смесей (Коваленко, 2022; Петрова, 2023). К преимуществам низкотемпературной сушки зерна обезвоженным воздухом, помимо отказа от дефицитных видов топлива, относятся: более полное сохранение качества высушиваемого зерна, повышение взрыво- и пожаробезопасности сушильной установки, снижение удельных энергозатрат на сушку, возможность использования существующих шахтных сушилок. Для этого в сушильную камеру в качестве сушильного агента достаточно подавать обезвоженный воздух (Соболева, 2009). Применение дегидратации в производстве безглютеновой продукции может стать эффективной альтернативой традиционным способам термической обработки, которая снижает биодоступность нутриентов (Schoenlechner et al., 2010).

Современные технологии в производстве безглютеновой выпечки

В настоящее время всё более востребованным становится производство продуктов здорового и функционального питания, в том числе безглютеновых хлебобулочных продуктов, востребованность которых обусловлена повышенной заинтересованностью населения к собственному здоровью, в частности ростом выявленных случаев глютеноассоциированных заболеваний. Вместе с тем представленные на рынке безглютеновые хлебобулочные изделия имеют явные отклонения по пищевой полноценности, обусловленные низкой массовой долей по содержанию белка, что ставит под сомнение их альтернативность для замены традиционных видов продукции (Рыжакова, & Головизнина, 2019; Пищиков & Лазарев, 2024). В последние годы все более актуальным становится производство пищевых продуктов для здорового и функционального питания, которые способны являться источниками всех необходимых организму макро- и микронутриентов (Ruiz-Aceituno et al., 2024).

Производство и потребление такой продукции становится всё более востребованным и подкреплено правовыми основами со стороны государства, включая большие вызовы научно-технологического развития РФ. В Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года формулируются различные направления развития с целью выпуска пищевой продукции, отвечающей принципам здорового питания¹. Закваски из киноа и амаранта больше всего похожи на традиционные (пшеничные): более высокое содержание молочной кислоты, более высокая антимикробная активность, более высокое общее содержание фенолов, более высокая антиоксидантная способность и более богатый бактериальный и грибковый состав (Федянина и соавт., 2017). Таким образом, они являются хорошей альтернативой для использования в качестве заменителя химических дрожжей в качестве добавки при производстве экологически чистого хлеба без глютена, поскольку их длительный процесс ферментации оказывает благотворное воздействие на здоровье, главным образом благодаря бактериальному составу, в котором преобладают бактерии рода *Lactobacillus*, бактерии, которые, согласно результатам исследования

¹ Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ: утверждена распоряжением Правительства РФ 29 июня 2016 г.

наилучшим образом адаптированы к 25 °С, поэтому лучше всего хранить закваски при комнатной температуре (Peñalver et al., 2024).

Актуальность производства хлебобулочных изделий специализированной направленности из нетрадиционных видов муки обусловлена такими основными направлениями, как питание людей с глютен-ассоциированными заболеваниями, среди которых не только целиакия, но и другие формы непереносимости глютена, а также людей, соблюдающих принципы здорового питания; расширение ассортимента, увеличение объема продаж за счет привлечения потребителя новыми, уникальными свойствами продукции; повышение пищевой ценности хлебобулочных изделий за счёт высокого содержания в такой муке витаминов, минеральных веществ, пищевых волокон и незаменимых аминокислот (Monteiro et al., 2023). *Amaranthus spp.* был предметом многочисленных обзоров, которые были написаны и опубликованы; эти исследования охватывают широкий спектр тем, включая производство, состав, применение и последствия для здоровья (Aderibigbe et al., 2022; Graziano et al., 2022).

Современные подходы к разработке безглютеновой хлебобулочной продукции включают использование ферментированных заквасок, пророщенных зерен и функциональных добавок (Rodríguez et al., 2023, Лапин & Соколова, 2024). Пророщенное зерно активирует амилолитические и протеолитические ферменты, что улучшает реологические свойства теста и способствует более равномерному развитию мякиша (Rodríguez et al., 2023; Лапин & Соколова, 2024). Ферментация и проращивание способствуют накоплению биологически активных веществ, что повышает нутритивную плотность продукта и делает его привлекательным для профилактического питания.

Несмотря на накопленные данные о пищевой ценности амаранта, эффективности экстракта виноградной косточки и преимуществах низкотемпературной дегидратации, в существующих исследованиях отсутствуют комплексные технологические решения, объединяющие эти компоненты в единую рецептуру. На сегодняшний день не представлено рецептов, которые бы одновременно обеспечивали: стабильную структуру безглютенового теста, сохранность нутриентов без интенсивной термообработки, низкую себестоимость за счёт локального сырья. Данная проблема особенно актуальна в контексте роста потребности

в профилактической продукции для детей с целиакией (Попов и соавт., 2024). Предлагаемая в настоящем исследовании технология, основанная на использовании пророщенного амаранта, экстракта виноградной косточки и частичной дегидратации, может восполнить этот пробел и стать основой для дальнейших прикладных и клинических разработок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Исследование носило экспериментальный характер и было направлено на разработку и оценку технологии производства безглютеновых хлебобулочных изделий из амаранта с применением экстракта виноградной косточки и частичной дегидратации. Основной задачей являлось сопоставление органолептических и физико-химических характеристик разработанного продукта с нормативными значениями и характеристиками существующих образцов безглютеновой продукции.

Исследование включало следующие этапы:

1. Подготовка и предварительная обработка сырья;
2. Частичная дегидратация амаранта (подцикл 1);
3. Проращивание амаранта в водном экстракте виноградной косточки (подцикл 2);
4. Приготовление закваски спонтанного брожения;
5. Ведение технологического процесса выпечки;
6. Оценка качества готового продукта.

Каждый этап выполнялся в трех повторностях. В качестве контрольного использовался образец безглютенового хлеба на основе классической смеси из рисовой и кукурузной муки.

Объекты исследования

В качестве объектов исследования использовались семена амаранта сорта «Каракула», выращенные в Ставропольском крае (урожай 2023 года); водный экстракт виноградной косточки серии GSE 95 % производства ООО «Фитотех» (Россия); гречневая и рисовая мука из бурого риса пищевого класса согласно ГОСТ Р 54683; очищенная вода в соответствии с ГОСТ 6709–72; а также свежее яблоко сорта «Антоновка».

Н.А. Есаулко, М.В. Селиванова, Д.С. Соломатин, Е.С. Романенко, Е.А. Миронова, М.С. Новак

Подготовка и обработка сырья

Семена амаранта проходили две стадии очистки:

- (1) первая стадия — механическое удаление крупного мусора с помощью семоочистительной машины ОВС-25;
- (2) вторая стадия — фотосепарация на промышленном фотосепараторе согласно ГОСТ 27186 для удаления чёрных и посторонних примесей.

Очищенные семена промывали в течение 1–2 минут и делили на две части в соответствии с исследовательскими подциклами.

Подцикл 1: Частичная дегидратация

Семена замачивали в дистиллированной воде ($t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) при соотношении 1:1 (масса:объём) в течение 5–7 часов. После замачивания образовавшийся осадок удаляли, и семена подвергали сушке в конвекционном шкафу при температуре 60–65 °C в течение 30–55 минут до достижения влажности 9%. Высушенное сырьё перемалывали в муку на лабораторной мельнице (производительность — 150 г/мин).

Подцикл 2: Проращивание в экстракте виноградной косточки

Семена замачивали в экстракте виноградной косточки (1:10 по массе) при температуре 23–28 °C и соотношении твёрдой и жидкой фазы 1:0,6 в течение 25–30 часов. Ростки амаранта использовали после достижения длины 3–7 мкм.

Полное набухание определяли по прекращению увеличения объёма и приобретению упругости. Ростки хранили в газостойких контейнерах при –25 °C до использования в производстве (не более 7 суток).

Приготовление закваски

Закваска спонтанного брожения готовилась в течение 8 суток путём ежедневного пополнения смеси. Исходная формула включала:

- 1. пророщенный амарант — 60 г,
- 2. вода — 120 мл,
- 3. гречневая мука — 25 г,
- 4. мука из бурого риса — 20 г,
- 5. тёртое яблоко с кожурой — 15 г.

Ферментация проходила при температуре 20–25 °C в условиях защиты от света и сквозняков. На 8-й день закваску использовали в выпечке, хранили при –25 °C не более 30 суток.

Технология выпечки

Выпечка производилась по следующей рецептуре (в пересчёте на 100 кг закваски) (Таблица 1).

Таблица 1

Массовая доля компонентов для приготовления безглютенового хлебобулочного изделия

Table 1

Mass Fractions of Components for Preparing a Gluten-Free Bakery Product

Компонент	Массовая доля, %
Вода	48,0
Гречневая мука	10,5
Мука из бурого риса	14,0
Пророщенный амарант	25,0
Яблоко тёртое	2,5

Тесто замешивали в лабораторной тестомесильной машине, расстаивали в течение 45 минут при температуре 32 °C и относительной влажности 75 %, затем выпекали при 180 °C в течение 40 минут.

Методы оценки качества продукции

Органолептический анализ

Оценка проводилась по ГОСТ 5667–2022, включала характеристики: внешний вид, форма, пористость, эластичность мякиша, вкус, аромат, наличие посторонних привкусов и запахов. Участвовали 10 дегустаторов (эксперты по пищевым продуктам), использовалась 5-балльная шкала.

Физико-химический анализ

Параметры измерялись в трёх повторностях, данные усреднялись. Применялись следующие методы:

- 1. влажность — по ГОСТ 21094–75;
- 2. пористость — по ГОСТ 5669–96;
- 3. кислотность — по ГОСТ 5670–96;
- 4. содержание глютена — иммуноферментные тест-системы типа RIDASCREEN Gliadin;
- 5. выход готового продукта — по массе после выпечки.

Н.А. Есаулко, М.В. Селиванова, Д.С. Соломатин, Е.С. Романенко, Е.А. Миронова, М.С. Новак

Обработка данных

Расчеты выполняли с помощью программы MS Excel. Анализы проводили в трех повторностях, относительная погрешность измерений не превышала 3 % при доверительной вероятности $P = 0,95$. Результаты измерений представлены как средние арифметические.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе представлены эмпирические данные, полученные в ходе разработки и апробации технологии производства безглютеновых хлебобулочных изделий на основе амаранта с использованием экстракта виноградной косточки и частичной дегидратации сырья. Представление результатов организовано поэтапно: сначала анализируются органолептические характеристики готовой продукции, затем — физико-химические показатели, сопоставленные с контрольными образцами. Такая структура позволяет системно оценить влияние предложенной технологии на качество конечного продукта и обосновать ее технологическую состоятельность.

Таблица 2

Органолептические характеристики опытного образца безглютенового хлебобулочного изделия

Table 2

Organoleptic Characteristics of the Experimental Sample of a Gluten-Free Bakery Product

Показатель		Среднее значение ($\pm SD$)	Критерий ГОСТ
Форма	Соответствует форме выпекания	$5,0 \pm 0,0$	Соответствует
Цвет корки	Темно-коричневый	$4,8 \pm 0,1$	Соответствует
Эластичность мякиша	Эластичный (после нажатия восстанавливается)	$4,9 \pm 0,1$	Соответствует
Вкус	С легкой кислинкой, с легким ореховым привкусом	$4,6 \pm 0,2$	Соответствует
Запах	Хлебный	$4,8 \pm 0,2$	Соответствует

Примечание. Балльная оценка по 5-балльной шкале, $n = 10$, среднее значение.

Note. Scoring on a 5-point scale; $n = 10$; mean value.

Таблица 3

Сравнительные физико-химические показатели хлебобулочных изделий

Table 3

Comparative Physicochemical Parameters of Bakery Products

Образец	Влажность, %	Пористость, %	Кислотность, град	Глютен, мг/кг	Выход хлеба, %
С использованием амаранта и экстракта	47,2	62	2,8	0	135,0
Средние значения БГ изделий (лит.)	19,0–65,0	>50,0	0,2–5,0	<20	140,0
Пшеничный формовой хлеб	49,0	55	7,0	70–80	130–150

Органолептические характеристики изделий

Результаты органолептической оценки хлебобулочных изделий, приготовленных с использованием пророщенного амаранта, экстракта виноградной косточки и технологии частичной дегидратации, представлены в Таблице 2. Испытуемые образцы соответствовали установленным требованиям по следующим параметрам: форма и внешний вид изделия соответствовали форме выпекания; поверхность была гладкой, без трещин и подрывов; корка — умеренно выпуклая, равномерно окрашенная. Мякиш характеризовался хорошей пропеченностью и эластичностью, пористость была равномерной, мелкой, без пустот. Вкус образцов — с легкой кислинкой, характерный для безглютеновой продукции, с легким ореховым привкусом. Запах — приятный, хлебный, без сторонних примесей.

Физико-химические характеристики

В результате физико-химического анализа установлено, что опытные образцы безглютеновых хлебобулочных изделий имели высокую степень пористости (72 %)

и низкое содержание влаги (47,2%), что благоприятно сказывается на их текстуре и сроке хранения. Кислотность составила 2,8 градуса, что соответствует физиологически приемлемым значениям. Содержание глютена не превышало 0 мг/кг, что подтверждает полное соответствие требованиям аглютеновой диеты (ГОСТ Р 58956–2020). Сравнительные данные по основным показателям представлены в Таблице 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты демонстрируют значительное улучшение потребительских и технологических характеристик хлебобулочных изделий, разработанных по предложенной технологии. Органолептический анализ подтвердил высокую оценку по всем пяти параметрам (вкус, запах, структура, пористость, внешний вид), что соответствует нормативам ГОСТ 5667–2022. Это особенно важно, учитывая традиционные трудности с текстурой и стабильностью безглютеновой выпечки, обусловленные отсутствием клейковины.

Сравнение с существующими аналогами

При сопоставлении с типичными безглютеновыми изделиями и традиционным пшеничным хлебом (см. Таблицу 3), опытные образцы показали превосходство по ряду ключевых параметров. Повышенная пористость (62% против 50–55%) и выход продукта (135%) указывают на улучшенные реологические свойства теста, вероятно, за счёт активации ферментов при проращивании зерна и взаимодействия полифенолов экстракта виноградной косточки с крахмалом и белками. Влажность, находящаяся в пределах 47,2%, также способствует более длительному сроку хранения и приятной текстуре мякиша, что согласуется с данными Иванова (2025).

Высокие функциональные характеристики изделий могут быть объяснены комплексным подходом к выбору сырья и способу его обработки. Применение частичной дегидратации при 60–65 °C позволяет минимизировать потери термолабильных соединений, таких как сквален, полифенолы и витамины группы В (Calderón de la Barca et al., 2022). Экстракт виноградной косточки не только улучшает структуру мякиша, но и проявляет выраженные антиоксидантные свойства, что положительно влияет на сроки хранения. Пророщенное зерно усиливает ферментативные процессы и обогащает продукт пищевыми волокнами, витаминами и минералами.

Продукция демонстрирует высокую нутритивную плотность, что особенно актуально в диетическом и детском питании. Амарант, как известно, содержит 16–18% белка с высоким содержанием лизина, а также минеральные вещества (кальций, магний, железо) и сквален. Амарант действительно превосходит другие злаки, поскольку богат белками и полифенольными соединениями, такими как флавоноиды, каротиноиды и токоферолы, которые оказывают множество полезных для здоровья эффектов. Кроме того, он содержит различные антипитательные компоненты, такие как фитиновая кислота и сапонины, которые связывают микро- и макроэлементы и делают их недоступными для нашего организма. Однако с помощью различных методов обработки, таких как ферментация, проращивание, экструзия и приготовление, их биодоступность может быть повышена (Jan et al., 2023). Учитывая полное отсутствие глютена (<1 мг/кг), изделия полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к диете при целиакии. В сочетании с антиоксидантами из виноградной косточки, продукт может оказывать положительное влияние на снижение оксидативного стресса, часто сопутствующего целиакии (Попов с соавт., 2024).

Особое внимание заслуживает низкая себестоимость продукции, обусловленная использованием локального сырья и простоты производственного цикла без энергоемкой термообработки. Это делает технологию перспективной для тиражирования в условиях регионального производства, в том числе в рамках программ по импортозамещению и продовольственной безопасности. Как отмечают Сидорова и соавт. (2022) добавление натуральных компонентов растительного происхождения позволяет улучшить органолептику изделий без дополнительных затрат на синтетические улучшители.

Тем не менее, полученные данные требуют дополнительной валидации: в частности, необходимы сенсорные панели с привлечением широкой потребительской выборки, а также биохимические анализы остаточных количеств проантоцианидинов и их активности после выпечки. Также перспективными представляются клинические исследования эффективности продукции в группах с подтвержденной целиакией, что подчеркнуто в рекомендациях Lohi et al. (2007).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная технология производства безглютеновых хлебобулочных изделий на основе амаранта с применением экстракта виноградной косточки и частичной дегидратации продемонстрировала высокую технологическую эффективность и улучшенные потребительские характеристики по сравнению с типичными безглютеновыми и традиционными пшеничными аналогами. Повышенная пористость, стабильная структура мякиша, отсутствие глютена и, достаточно высокий выход изделия, позволяют рекомендовать данную рецептуру как перспективное направление в производстве функциональных продуктов питания.

Пищевая ценность изделий, обогащённых природными антиоксидантами и белком из пророщенного амаранта, делает их особенно актуальными для профилактики целиакии и коррекции дефицитных состояний. Энергосберегающая низкотемпературная обработка и использование локального сырья обеспечивают экономическую целесообразность масштабирования технологии.

Ограничения исследования связаны, прежде всего, с ограниченным объемом клинической и микробиологической оценки полученных изделий: в рамках данной работы не проводились исследования по усвояемости, гликемическому индексу и воздействию на маркеры воспаления у целевых групп (например, пациентов с целиакией). Кроме того, органолептический анализ осуществлялся в рамках экспертной панели, без вовлечения репрезентативной выборки потребителей, что ограничивает обобщаемость результатов.

В дальнейшем планируется расширение номенклатуры продуктов на основе данной технологии (включая детское и лечебное питание), а также проведение углубленных исследований по пищевой безопасности, клинической эффективности и стабильности рецептур при длительном хранении. Также перспективным

направлением видится внедрение цифрового мониторинга параметров ферментации и биохимического состава, в том числе с применением ИИ-технологий.

ОПИСАНИЕ АВТОРСКОГО ВКЛАДА

Наталья Александровна Есаулко: разработка методологии; формальный анализ.

Мария Владимировна Селиванова: разработка методологии; проведение исследования; визуализация; написание черновика рукописи.

Данил Сергеевич Соломатин: курирование данных; формальный анализ; валидация результатов.

Елена Семеновна Романенко: разработка концепции; научное руководство; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Елена Алексеевна Миронова: предоставление ресурсов; проведение исследования; визуализация.

Мария Сергеевна Новак: административное руководство исследовательским проектом; получение финансирования.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Natalia A. Esaulko: methodology; formal analysis.

Maria V. Selivanova: methodology; investigation; visualization; writing — original draft.

Danil S. Solomatin: data curation; formal analysis; validation.

Elena S. Romanenko: conceptualization; supervision; writing — review & editing.

Elena A. Mironova: resources; investigation; visualization.
Maria S. Novak: project administration; funding acquisition.

ЛИТЕРАТУРА

- Бараняк Дж., Добровольска К. М. (2022). Двойственная природа амаранта — функционального продукта питания и потенциального лекарства. *Продукты питания*, 11(4), 618. <https://doi.org/10.3390/foods11040618>
- Быкова, С.В., Парфенов, А.И., & Сабельникова, Е.А. (2018). Эпидемиология целиакии в мире. *Альманах клинической медицины*, 46(1), 23–31. <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2018-46-1-23-31>
- Волкова, А. В. Влияние нетрадиционного зернового сырья на аминокислотный состав хлеба (2023). Научный и экономический потенциал развития общества: теория и практика: *Материалы всероссийской*

- научно-практической конференции (с. 281–289). Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет.
- Иванова, Н.Н. (2025). Эффективность использования амарантовой муки в производстве мелкоштучных хлебобулочных изделий. *Международный научно-исследовательский журнал*, (151). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.2>
- Морозова, Д. А. (2021). Анализ антиоксидантной активности экстрактов виноградной косточки в безглютеновых продуктах. *Химия и технология пищевых продуктов*, 12(1), 34–40.
- Morozova, D. A. (2021). Analysis of the antioxidant activity of grape seed extracts in gluten-free products. *Chemistry and Technology of Food Products*, 12(1), 34–40.
- Никитин, И. А. (2005). *Применение муки амаранта и модифицированных композиций на его основе в технологии хлеба* [Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук]. Воронежская государственная технологическая академия.
- Пищиков, Г.Б., & Лазарев, В.А. (2024). Разработка хлебобулочных изделий повышенной биологической ценности из нетрадиционных видов муки. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии»*, 12(4), 40–51. <https://doi.org/10.14529/food240405>
- Пономарев, С.В., Зотов, А.Н., & Воронов, Д.В. (2024). Фитохимические компоненты, и промышленное применение виноградных косточек. Краткий обзор мировых исследований. *Эффективное животноводство*, 1(191), 70–73.
- Попов, В. И., Бавыкина И. А., Звягин А. А., Мирошниченко Л. А., & Бавыкин Д.В. (2024). Значение продуктов из амаранта в диетическом рационе питания детей с непереносимостью глютена. *Вопросы питания*, 93(4), 14–21. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-4-14-21>
- Рыжакова, А. В. & Головизнина, М. С. (2019). Использование альтернативных видов сырья при создании безглютеновой кондитерской продукции. *Пищевая промышленность: наука и технологии*, 12(3), 42–48.
- Сидорова, Ю., Бирюлина, Н., Зилова, И., & Мазо, В. (2022). Белки зерна амаранта: перспективы использования в специализированной пищевой продукции. *Вопросы питания*, 91(3), 96–106.
- Тлиф, А. И., Кондратьева, Е. И., Черняк, И. Ю., Долбнева, О. В., Штода, И. И., & Головенко, И. М. (2012). Распространенность полиморфных вариантов генов HLA DQA1 и DQB1 у больных сахарным диабетом 1-го типа и целиакией в Краснодарском крае. *Кубанский научный медицинский вестник*, (5), 65–70.
- Тохтиева, Л. Х. & Тохтиева, Э. А. (2022). Амарант — источник повышения пищевой ценности хлеба. *Теория и практика современной аграрной науки* (с. 1097–1099). Новосибирск: Новосибирский государственный аграрный университет.
- Федянина, Л. Н., Смертина, Е. С., Лях, В. А. & Соболева, Е. В. (2017). Экспериментальное обоснование эффективности действия функциональных хлебобулочных изделий с добавлением экстрактов водных и растительных объектов Дальнего Востока. *Техника и технология пищевых производств*, 4(47), 84–91. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-84-91>
- Черкасова, Е. А. (2024). *Динамика заболеваемости и генетические особенности целиакии у детей и подростков, проживающих в Ставропольском крае* [Диссертации кандидата медицинских наук]. Ставропольский государственный медицинский университет.
- Щербакова, Е.И., Кузнецова, А.В. (2022) Перспективы использования муки амаранта в производстве мучных изделий (обзор литературы). *Товаровед продовольственных товаров*, (2), 86–91. <https://doi.org/10.33920/igt-01-2202-01>
- Aderibigbe, O.R., Ezekiel, O.O., Owolade, S.O., Korese, J.K., Sturm, B., Hensel, O. (2022). Exploring the potentials of underutilized grain amaranth (*Amaranthus spp.*) along the value chain for food and nutrition security: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(3), 656–669. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1825323>
- Alvarez-Jubete, L., Arendt, E. K. & Gallagher, E. (2010). Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(4), 240–257. <https://doi.org/10.1080/09637480902950597>
- Ahmed, A., Akram, Q., Naz, W., Akhtar, S., Amjad, I., Ashraf, M., Shakeel, A., Saeed, A., Sarfraz, S., Shamim, F., Shahzadi, N., Kashif, M., & Mahmood, N. (2022). Possible revolutionary substitute to wheat: A review on nutrient

- rich and healthy diet development by pseudo cereals. *Biological and Clinical Sciences Research Journal*, (1). <https://doi.org/10.54112/bcsrj.v2022i1.108>
- Balakrishnan, G, Schneider, RG. (2022). The role of amaranth, quinoa, and millets for the development of healthy, sustainable food products — A concise review. *Foods*, 11(16), 2442. <https://doi.org/10.3390/foods11162442>
- Calderón de la Barca, A. M., Mercado-Gómez, L. E., Heredia-Sandoval, N. G., Luna-Alcocer, V., Porras Loaiza, P. M. A., González-Ríos, H., & Islas-Rubio, A. R. (2022). Highly nutritional bread with partial replacement of wheat by amaranth and orange sweet potato. *Foods*, 11(10), Article 1473. <https://doi.org/10.3390/foods11101473>
- Eduardo, K., Bedoya-Perales, N., Escobedo-Pacheco, E., & Saldaña, E. (2024). Sensory and consumer science as a valuable tool to the development of quinoa-based food products: More than three decades of scientific evidence. *Scientia Agropecuaria*, 15(2), 251–267. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.019>
- Hager, A.-S., Wolter, A., Jacob, F., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2012). Nutritional properties and ultra-structure of commercial gluten free flours from different botanical sources compared to wheat flours. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.06.005>
- Graziano, S., Agrimonti, C., Marmiroli, N., & Gulli, M. (2022). Utilisation and limitations of pseudocereals (quinoa, amaranth, and buckwheat) in food production: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 125(2). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.007>
- Kaur, N, Kaur, S, Agarwal, A, Sabharwal, M, Tripathi, AD. (2024). Amaranthus crop for food security and sustainable food systems. *Planta*, 260(3), 59. <https://doi.org/10.1007/s00425-024-04490-3>
- Lohi, S., Mustalahti, K., Kaukinen, K., Laurila, K., Collin, P., Rissanen, H., Lohi, O., Bravi, E., Gasparin, M., Reunanen, A. & Mäki, M. (2007). Increasing prevalence of coeliac disease over time. *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 26(9), 1217–1225. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2036.2007.03502.x>
- Jan N, Hussain SZ, Naseer B, Bhat TA. (2023) Amaranth and quinoa as potential nutraceuticals: A review of anti-nutritional factors, health benefits and their applications in food, medicinal and cosmetic sectors. *Food Chemistry: X*, 18, 100687. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100687>
- Meena, V. S., Gora, J. S., Singh, A., Ram, C., Meena, N. K., Pratibha, Roupheal, Y., Basile, B., & Kumar, P. (2022). Underutilized fruit crops of Indian arid and semi-arid regions: Importance, conservation and utilization strategies. *Horticulturae*, 8(2), 171. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8020171>
- Monteiro, Sh.S., Schnorr, C.E., De.B. & Pasquali, M.A. (2023). Paraprobiotics postbiotics. Current state of scientific research and future trends toward the development of functional foods. *Foods*, 12, 23–34. <https://doi.org/10.3390/foods12122394>
- Oprea, O. B., Popa, M. E., Apostol, L., & Gaceu, L. (2022). Research on the potential use of grape seed flour in the bakery industry. *Foods*, 11(11), 1589. <https://doi.org/10.3390/foods11111589>
- Peñalver, R., Díaz-Vásquez, W., Maulén, M., Nieto, G. (2024) Sustainable processes and physico-chemical characterization of artisanal spontaneous gluten (quinoa, amaranth and brown rice) compared to wheat sourdough. *Sustainability*, 16, Article 3297. <https://doi.org/10.3390/su16083297>
- Rodríguez, M., Bianchi, F., Simonato, B., Rizzi, C., Fontana, A., & Tironi, V. A. (2023). Exploration of grape pomace peels and amaranth flours as functional ingredients in the elaboration of breads: Phenolic composition, bioaccessibility, and antioxidant activity. *Food & Function*, 15(2), 608–624. <https://doi.org/10.1039/d3fo04494g>
- Ruiz-Aceituno, L., Casado, N., Arriero-Romo, E., Morante-Zarcelo, S., Lázaro, A.; Sierra, I. (2024). Development of gluten-free bread based on maize and buckwheat and enriched with aromatic herbs and spices. *Applied Sciences*, 14, Article 3348. <https://doi.org/10.3390/app14083348>
- Savvateeva, L. V., Erdes, S. I., Antishin, A. S., & Zamyatnin, A. A. (2017). Overview of celiac disease in Russia: regional data and estimated prevalence. *Journal of Immunology Research*, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2017/2314813>
- Siddiqui, S.A., Mahmud, M.M.C., Abdi, G., Wanich, U., Farooqi, M.Q.U., Settapramote, N., Khan, S., & Wani, S.A. (2022). New alternatives from sustainable sources to wheat in bakery foods: Science, technology, and challenges. *Journal of Food Biochemistry*, 46(9), Article e14185. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14185>

- Schoenlechner, R., Drausinger, J., Ottenschlaeger, V., Jurackova, K., & Berghofer, E. (2010). Functional properties of gluten-free pasta produced from amaranth, quinoa and buckwheat. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65(4), 339–349. <https://doi.org/10.1007/s11130-010-0194-0>
- Šmídová, Z.; Rysová, J. (2022). Gluten-free bread and bakery products technology. *Foods*, 11(3), 480. <https://doi.org/10.3390/foods11030480>
- Yalcin, E., Gok, I., & Ozdal, T. (2022). Effect of grape seed flour on the phenolic profile, antioxidant capacity and sensory properties of muffins. *Latin American Applied Research, An international journal* 52(3), 213–220. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2022.921>
- Yano, H. (2020). Recent advances in the understanding of gluten-free bread structure. *npj Science of Food*, 3, Article 7. <https://doi.org/10.1038/s41538-019-0040-1>

REFERENCES

- Baraniak, J., & Dobrowolska, K. M. (2022). The dual nature of amaranth — Functional food and potential medicine. *Foods*, 11(4), 618. <https://doi.org/10.3390/foods11040618>
- Bykova, S.V., Parfeno, A.I., & Sabel'nikova, E.A. (2018). Epidemiology of celiac disease in the world. *The Almanac of Clinical Medicine*, 46(1), 23–31. <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2018-46-1-23-31>
- Volkova, A. V. (2023). The influence of non-traditional grain raw materials on the amino acid composition of bread. *Scientific and Economic Potential for Society's Development: Theory and Practice: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference* (pp. 281–289). Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University.
- Ivanova, N.N. (2025). The effectiveness of using amaranth flour in the production of small-piece bakery products. *International Scientific Research Journal*, (151). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.2>
- Morozova, D. A. (2021). Analysis of the antioxidant activity of grape seed extracts in gluten-free products. *Chemistry and Technology of Food Products*, 12(1), 34–40.
- Nikitin, I. A. (2005). *The use of amaranth flour and modified compositions based on it in bread technology* [Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. Voronezh State Technological Academy.
- Pischikov, G.B., & Lazarev, V.A. (2024). Development of bakery products of increased biological value from non-traditional types of flour. *Bulletin of SUSU. The series "Food and Biotechnology"*. 2024, 12(4), 40–51. <https://doi.org/10.14529/food240405>
- Ponomarev, S.V., Zotov, A.N., & Voronov, D.V. (2024). Phytochemical components, and industrial use of grape seeds. A brief overview of world research. *Efficient Animal Husbandry*, 1 (191), 70–73.
- Popov, V. I., Bavykina, I. A., Zvyagin, A. A., Miroshnichenko L. A., & Bavykin D.V. (2024). The significance of amaranth products in the dietary nutrition of children with gluten intolerance. *Nutrition Issues*, 93(4), 14–21. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-4-14-21>
- Ryzhakova, A. V. & Goloviznina, M. S. (2019). The use of alternative types of raw materials in the creation of gluten-free confectionery products. *Food Industry: Science and Technology* 12(3), 42–48.
- Sidorova, Yu., Biryulina, N., Zilova, I., & Mazo, V. (2022). Amaranth grain proteins: Prospects for use in specialized food products. *Nutrition Issues*, 91(3), 96–106.
- Tlif, A. I., Kondrat'eva, E. I., Chernyak, I. Yu., Dolbneva, O. V., Shtoda, I. I. & Golovenko, I. M. (2012). Prevalence of polymorphic variants of HLA DQA1 and DQB1 genes in patients with type 1 diabetes mellitus and celiac disease in the Krasnodar Territory. *Kuban Scientific Medical Bulletin*, (5), 65–70.
- Tokhtieva, L. Kh. & Tokhtieva, E. A. (2022). Amaranth — A source of increasing the nutritional value of bread. *Theory and practice of modern agricultural science* (pp. 1097–1099). Novosibirsk: Novosibirsk State Agrarian University.
- Fedyanina L. N., Smertina E. S., Lyakh V. A., Soboleva E. V. (2017). Experimental confirmation of the efficiency of functional bakery products containing extracts from far east plant and aquatic species. *Food Processing: Techniques and Technology*, 47(4), 84–91. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-84-91>

- Cherkasova, E. A. (2024). *Dynamics of morbidity and genetic features of celiac disease in children and adolescents living in the Stavropol Territory* [Unpublished doctoral dissertation]. Stavropol State Medical University.
- Shcherbakova, E.I., Kuznetsova, A.V. (2022) Prospects for the use of amaranth flour in the production of flour products (literature review). *Food Product Expert*, 2. <https://doi.org/10.33920/igt-01-2202-01>
- Aderibigbe, O.R., Ezekiel, O.O., Owolade, S.O., Korese, J.K., Sturm, B., Hensel, O. (2022). Exploring the potentials of underutilized grain amaranth (*Amaranthus spp.*) along the value chain for food and nutrition security: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(3), 656–669. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1825323>
- Alvarez-Jubete, L., Arendt, E. K. & Gallagher, E. (2010). Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(4), 240–257. <https://doi.org/10.1080/09637480902950597>
- Ahmed, A., Akram, Q., Naz, W., Akhtar, S., Amjad, I., Ashraf, M., Shakeel, A., Saeed, A., Sarfraz, S., Shamim, F., Shahzadi, N., Kashif, M., & Mahmood, N. (2022). Possible revolutionary substitute to wheat: A review on nutrient rich and healthy diet development by pseudo cereals. *Biological and Clinical Sciences Research Journal*, (1). <https://doi.org/10.54112/bcsrj.v2022i1.108>
- Balakrishnan, G, Schneider, RG. (2022). The role of amaranth, quinoa, and millets for the development of healthy, sustainable food products — A concise review. *Foods*, 11(16), 2442. <https://doi.org/10.3390/foods11162442>
- Calderón de la Barca, A. M., Mercado-Gómez, L. E., Heredia-Sandoval, N. G., Luna-Alcocer, V., Porras Loaiza, P. M. A., González-Ríos, H., & Islas-Rubio, A. R. (2022). Highly nutritional bread with partial replacement of wheat by amaranth and orange sweet potato. *Foods*, 11(10), Article 1473. <https://doi.org/10.3390/foods11101473>
- Eduardo, K., Bedoya-Perales, N., Escobedo-Pacheco, E., & Saldaña, E. (2024). Sensory and consumer science as a valuable tool to the development of quinoa-based food products: More than three decades of scientific evidence. *Scientia Agropecuaria*, 15(2), 251–267. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.019>
- Hager, A.-S., Wolter, A., Jacob, F., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2012). Nutritional properties and ultra-structure of commercial gluten free flours from different botanical sources compared to wheat flours. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.06.005>
- Graziano, S., Agrimonti, C., Marmiroli, N., & Gulli, M. (2022). Utilisation and limitations of pseudocereals (quinoa, amaranth, and buckwheat) in food production: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 125(2). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.007>
- Kaur, N, Kaur, S, Agarwal, A, Sabharwal, M, Tripathi, AD. (2024). Amaranthus crop for food security and sustainable food systems. *Planta*, 260(3), 59. <https://doi.org/10.1007/s00425-024-04490-3>
- Lohi, S., Mustalahti, K., Kaukinen, K., Laurila, K., Collin, P., Rissanen, H., Lohi, O., Bravi, E., Gasparin, M., Reunanen, A. & Mäki, M. (2007). Increasing prevalence of coeliac disease over time. *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 26(9), 1217–1225. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2036.2007.03502.x>
- Jan N, Hussain SZ, Naseer B, Bhat TA. (2023) Amaranth and quinoa as potential nutraceuticals: A review of anti-nutritional factors, health benefits and their applications in food, medicinal and cosmetic sectors. *Food Chemistry: X*, 18, 100687. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100687>
- Meena, V. S., Gora, J. S., Singh, A., Ram, C., Meena, N. K., Pratibha, Rouphael, Y., Basile, B., & Kumar, P. (2022). Underutilized fruit crops of Indian arid and semi-arid regions: Importance, conservation and utilization strategies. *Horticulturae*, 8(2), 171. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8020171>
- Monteiro, Sh.S., Schnorr, C.E., De.B. & Pasquali, M.A. (2023). Paraprobiotics postbiotics. Current state of scientific research and future trends toward the development of functional foods. *Foods*, 12, 23–34. <https://doi.org/10.3390/foods12122394>
- Oprea, O. B., Popa, M. E., Apostol, L., & Gaceu, L. (2022). Research on the potential use of grape seed flour in the bakery industry. *Foods*, 11(11), 1589. <https://doi.org/10.3390/foods11111589>
- Peñalver, R., Díaz-Vásquez, W., Maulén, M., Nieto, G. (2024) Sustainable processes and physico-chemical characterization of artisanal spontaneous gluten (quinoa, amaranth and brown rice) compared to wheat sourdough. *Sustainability*, 16, Article 3297. <https://doi.org/10.3390/su16083297>

- Rodríguez, M., Bianchi, F., Simonato, B., Rizzi, C., Fontana, A., & Tironi, V. A. (2023). Exploration of grape pomace peels and amaranth flours as functional ingredients in the elaboration of breads: Phenolic composition, bioaccessibility, and antioxidant activity. *Food & Function*, 15(2), 608–624. <https://doi.org/10.1039/d3fo04494g>
- Ruiz-Aceituno, L., Casado, N., Arriero-Romo, E., Morante-Zarcelero, S., Lázaro, A., Sierra, I. (2024). Development of gluten-free bread based on maize and buckwheat and enriched with aromatic herbs and spices. *Applied Sciences*, 14, Article 3348. <https://doi.org/10.3390/app14083348>
- Savvateeva, L. V., Erdes, S. I., Antishin, A. S., & Zamyatnin, A. A. (2017). Overview of celiac disease in Russia: regional data and estimated prevalence. *Journal of Immunology Research*, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2017/2314813>
- Siddiqui, S. A., Mahmud, M. M. C., Abdi, G., Wanich, U., Farooqi, M. Q. U., Settapramote, N., Khan, S., & Wani, S. A. (2022). New alternatives from sustainable sources to wheat in bakery foods: Science, technology, and challenges. *Journal of Food Biochemistry*, 46(9), Article e14185. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14185>
- Schoenlechner, R., Drausinger, J., Ottenschlaeger, V., Jurackova, K., & Berghofer, E. (2010). Functional properties of gluten-free pasta produced from amaranth, quinoa and buckwheat. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65(4), 339–349. <https://doi.org/10.1007/s11130-010-0194-0>
- Šmídová, Z.; Rysová, J. (2022). Gluten-free bread and bakery products technology. *Foods*, 11(3), 480. <https://doi.org/10.3390/foods11030480>
- Yalcin, E., Gok, I., & Ozdal, T. (2022). Effect of grape seed flour on the phenolic profile, antioxidant capacity and sensory properties of muffins. *Latin American Applied Research, An international journal* 52(3), 213–220. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2022.921>
- Yano, H. (2020). Recent advances in the understanding of gluten-free bread structure. *npj Science of Food*, 3, Article 7. <https://doi.org/10.1038/s41538-019-0040-1>

ОБ АВТОРАХ

Есаулко Наталия Александровна, к.с.-х.н., доцент кафедры садоводства и переработки растительного сырья им. проф. Н.М. Куренного «Ставропольский государственный аграрный университет» (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1901-3616>, Scopus ID: 56801107500, SPIN-код: 3940-8702, e-mail: Esaulko70@mail.ru

Селиванова Мария Владимировна, к.с.-х.н., доцент, зав.кафедрой садоводства и переработки растительного сырья им. проф. Н.М. Куренного «Ставропольский государственный аграрный университет» (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5770-6272>, Scopus ID: 56800770900, SPIN-код: 7243-3618, e-mail: selivanova86@mail.ru

Соломатин Данил Сергеевич, студент 3 курса специальность «Агрономия» «Ставропольский государственный аграрный университет» (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12), e-mail: solomatindanil@vk.com

Романенко Елена Семеновна, к.с.-х.н., доцент кафедры садоводства и переработки растительного сырья им. проф. Н.М. Куренного «Ставропольский государственный аграрный университет» (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6514-414X>, Scopus ID: 56800299500, SPIN-код: 4169-4840, e-mail: elena_r65@mail.ru

Миронова Елена Алексеевна, к.т.н., доцент кафедры садоводства и переработки растительного сырья им. проф. Н.М. Куренного «Ставропольский государственный аграрный университет» (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2425-0528>, Scopus ID: 57211159116, SPIN-код: 8387-9985, e-mail: elena_st_86@mail.ru

Новак Мария Сергеевна, ассистент кафедры садоводства и переработки растительного сырья им. проф. Н.М. Куренного «Ставропольский государственный аграрный университет» (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6958-5815>, Scopus ID: 57211159969, SPIN-код: 6992-2750, e-mail: masha.german.93@mail.ru

AUTHOR INFORMATION

Esaulko Natalya Aleksandrovna, Cand. Sci. (Agricultural), Associate Professor of the Department of Horticulture and Processing of Plant Raw Materials named after prof. N.M. Kurennoy Stavropol State Agrarian University (355017, Russian Federation, Stavropol, Zootekhnichesky lane 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1901-3616>, Scopus ID: 56801107500, SPIN-код: 3940-8702, e-mail: Esaulko70@mail.ru

Selivanova Maria Vladimirovna, Cand. Sci. (Agricultural), Associate Professor, Head of Department of Horticulture and Processing of Plant Raw Materials named after prof. N.M. Kurennoy Stavropol State Agrarian University (355017, Russian Federation, Stavropol, Zootekhnichesky lane 12), <https://orcid.org/0000-0001-5770-6272>, Scopus ID: 56800770900, SPIN-код: 7243-3618, e-mail: selivanova86@mail.ru

Solomatин Danil Sergeevich, student 3 course specialization «Agronomy» Stavropol State Agrarian University (355017, Russian Federation, Stavropol, Zootekhnichesky lane 12), e-mail: solomatindanil@vk.com

Romanenko Elena Semenovna, Cand. Sci. (Agricultural), Associate Professor of the Department of Horticulture and Processing of Plant Raw Materials named after prof. N.M. Kurennoy Stavropol State Agrarian University (355017, Russian Federation, Stavropol, Zootekhnichesky lane 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6514-414X>, Scopus ID: 56800299500, SPIN-код: 4169-4840, e-mail: elena_r65@mail.ru

Mironova Elena Alekseevna, Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor of the Department of Horticulture and Processing of Plant Raw Materials named after prof. N.M. Kurennoy Stavropol State Agrarian University (355017, Russian Federation, Stavropol, Zootekhnichesky lane 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2425-0528>, Scopus ID: 57211159116, SPIN-код: 8387-9985, e-mail: elena_st_86@mail.ru

Novak Maria Sergeevna, Assistant of the Department of Horticulture and Processing of Plant Raw Materials named after prof. N.M. Kurennoy Stavropol State Agrarian University (355017, Russian Federation, Stavropol, Zootekhnichesky lane 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6958-5815>, Scopus ID: 57211159969, SPIN-код: 6992-2750, e-mail: masha.german.93@mail.ru

Химические загрязнители готовой продукции: контроль и снижение уровней контаминации (Обзор предметного поля)

О.И. Лаврухина^{1,2}, Д.А. Макаров¹, Е.С. Козеичева¹, Т.В. Балагула³, А.В. Третьяков¹, М.А. Гергель¹, Е.А. Лозовая¹

¹ Всероссийский государственный центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов, г. Москва, Российская Федерация

² Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация

³ Федеральная служба по ветеринарному и фитосанитарному надзору, г. Москва, Российская Федерация

Корреспонденция:
Лаврухина Ольга Игоревна
E-mail: hamsster@mail.ru

Конфликт интересов:
авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 13.02.2025

Принята: 15.06.2025

Опубликована: 30.06.2025

Финансирование:
Работа выполнена на базе ФГБУ «ВГНКИ»

Copyright: © 2025 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение: Безопасность готовой пищевой продукции предполагает контроль загрязнения на всех этапах её жизненного цикла — от получения продовольственного сырья до хранения и распределения. С учётом внедрения новых технологий и материалов в химической, фармацевтической, пищевой и аграрной отраслях, а также обновлённых данных о токсичности отдельных соединений, возникает необходимость регулярной актуализации сведений о потенциальных загрязнителях, методах их контроля и способах снижения уровней контаминации.

Цель: Представить актуализированную картину химической контаминации пищевой продукции, с охватом основных этапов её формирования (сырьё, производство, упаковка, хранение), современных методов определения загрязнителей и подходов к снижению их содержания.

Материалы и методы: Поиск научных публикаций осуществлялся в базах данных Scopus, ScienceDirect, PubMed и РИНЦ с охватом источников с 2011 по 2024 гг. В качестве поисковых дескрипторов использовались: chemical contamination (химическое загрязнение), chemical risk/hazards (химический риск / химические угрозы), food raw materials (продовольственное сырьё), ready-to-eat products/dishes (готовые к употреблению продукты / блюда), processed food (переработанная продукция). Отбор источников проводился по протоколу PRISMA-ScR с использованием менеджера ссылок Mendeley. Для визуального картографирования данных применялись табличные средства Microsoft Excel. Дополнительно были проанализированы сведения из системы «Ветис» (компонент «Веста») и официальные данные компетентных ведомств РФ и зарубежных стран (включая Роспотребнадзор и ANSES).

Результаты: В условиях активного технологического развития перечень химических загрязнителей значительно расширился за счёт микро- и нанопластика, а также продуктов трансформации фармацевтических веществ и пестицидов. Анализ остаточных количеств антибиотиков (2020–2024 гг.) в животноводческом сырье и готовой продукции показал регулярное выявление фторхинолонов, тетрациклинов, пенициллинов, амфениколов и сульфаниламидов. Перспективным направлением является применение природных биологически активных веществ, способных одновременно снижать контаминацию (в частности, ПАУ и нитрозамины) и заменять синтетические пищевые добавки. Выявлена необходимость в разработке чувствительных и надёжных аналитических методик, обеспечивающих идентификацию как давно известных, так и новых загрязнителей.

Выводы: Результаты данного обзора могут быть использованы при планировании программ государственного и производственного мониторинга, а также при разработке мер по совершенствованию контроля химической безопасности на предприятиях пищевой отрасли.

Ключевые слова: контаминация продовольственного сырья; безопасность готовой продукции; химические загрязнители; риск загрязнения; методы анализа; снижение уровня загрязнения



Для цитирования: Лаврухина О.И., Макаров Д.А., Козеичева Е.С., Балагула Т.В., Третьяков А.В., Гергель М.А., Лозовая Е.А. (2025) Химические загрязнители готовой продукции: контроль и снижение уровней контаминации (Обзор предметного поля). *FOOD METAENGINEERING*. 3(2). 27–78. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.78>

Chemical Contaminants in Ready-to-Eat Food Products: Control and Contamination Mitigation (A Scoping Review)

Olga I. Lavrukina^{1,2}, Dmitry A. Makarov¹, Elizaveta S. Kozeicheva¹, Tatiana V. Balagula³, Alexey V. Tretyakov¹, Maria A. Gergel¹, Evgeniya A. Lozovaya¹

¹ The Russian State Center for Animal Feed and Drug Standardization and Quality, Moscow, Russian Federation

² Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, Russian Federation

³ Federal Service for Veterinary and Phytosanitary Surveillance, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: Ensuring the safety of ready-to-eat food products requires contamination control at all stages of their life cycle—from the procurement of food raw materials to storage and distribution. In light of the introduction of new technologies and materials in the chemical, pharmaceutical, food, and agricultural sectors, as well as updated data on the toxicity of certain compounds, there is a growing need to regularly update information on potential food contaminants, methods for their detection, and strategies for reducing contamination levels.

Purpose: To provide an updated overview of chemical contamination in food products, covering key stages of its formation (raw materials, production, packaging, storage), modern methods of contaminant detection, and approaches to reducing their presence.

Materials and Methods: The literature search was conducted in the Scopus, ScienceDirect, PubMed, and RSCI databases, covering sources published between 2011 and 2024. The following descriptors were used: *chemical contamination, chemical risk/hazards, food raw materials, ready-to-eat products/dishes, processed food*. Source selection followed the PRISMA-ScR protocol, using Mendeley as a reference manager. Microsoft Excel was used for bibliographic mapping and data visualization. Additional information was drawn from the Russian national veterinary information system Vetis (component “Vesta”) and official reports from relevant regulatory agencies in Russia and abroad (including Rospotrebnadzor and ANSES).

Results: Against the backdrop of rapid technological advancement, the range of chemical contaminants has expanded significantly, particularly due to the inclusion of micro- and nanoplastics as well as transformation products of pharmaceutical substances and pesticides. Analysis of antibiotic residues in livestock raw materials and processed products (2020–2024) indicates frequent detection of fluoroquinolones, tetracyclines, penicillins, amphenicols, and sulfonamides. A promising direction involves the use of natural bioactive compounds that not only help reduce contamination (especially from polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and nitrosamines) but also serve as alternatives to synthetic food additives. The need for highly sensitive and reliable analytical methods capable of detecting both long-established and emerging contaminants has been clearly identified.

Conclusion: The results of this scoping review may be applied in the planning and implementation of governmental and industrial food safety monitoring programs, as well as in the development of improved chemical safety control measures for food production facilities.

Keywords: contamination of food raw materials; ready-to-eat product safety; chemical contaminants; contamination risk; analytical methods; contamination mitigation

Correspondence:

Olga I. Lavrukina

E-mail: hamsster@mail.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 13.02.2025

Accepted: 15.06.2025

Published: 30.06.2025

Funding:

The research was performed on the base FGBl «VGNKI».

Copyright: © 2025 The Authors



To cite: Lavrukina O.I., Makarov D.A., Kozeicheva E.S., Balagula T.V., Tretyakov A.V., Gergel M.A., Lozovaya E.A. (2025) Chemical Contaminants in Ready-to-Eat Food Products: Control and Contamination Mitigation (A Scoping Review). *FOOD METAENGINEERING*. 3(2). 27–78. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.78>

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение химической безопасности пищевых продуктов относится к приоритетным задачам национальных систем здравоохранения и продовольственного контроля, поскольку напрямую связано с предупреждением хронических заболеваний, снижением токсикологической нагрузки и защитой репродуктивного здоровья. Безопасность пищевой продукции предполагает отсутствие недопустимых рисков, обусловленных действием вредных веществ как на потребителя, так и на будущие поколения¹. Готовые к употреблению продукты, особенно переработанные блюда смешанного состава, представляют собой критическую категорию с точки зрения химической безопасности, поскольку их контаминация может происходить на любом этапе пищевой цепи (от получения продовольственного сырья до стадий упаковки, хранения и транспортировки).

Наибольшую обеспокоенность в контексте пищевой контаминации вызывают вещества химической природы. Хотя перечень известных загрязнителей уже достаточно подробно охарактеризован в научной и нормативной литературе (см. Лаврухина и соавт., 2017), развитие аналитических методик, в том числе высокочувствительных инструментальных подходов, способствует расширению знания о новых соединениях и продуктах их трансформации. Эти вещества всё чаще рассматриваются как потенциально опасные и относятся к категории «новых» загрязнителей. Несмотря на растущий объём эмпирических данных, систематические обзоры, посвящённые химической контаминации именно готовой продукции, остаются крайне ограниченными. Одним из немногих фундаментальных исследований в этом направлении является работа Nerín et al. (2016), сосредоточенная, в первую очередь, на миграции соединений из упаковки. Отсутствие комплексных и актуализированных обобщений, охватывающих не только источники загрязнения, но и меры по их контролю и снижению, подтверждает актуальность и научную необходимость проведения настоящего обзора.

Вопросу оценки риска химической контаминации в настоящее время посвящён ряд методологических решений, различающихся по сложности, точности и области применения. Одним из наиболее научно обоснованных

подходов является расчёт соотношения риска и пользы, реализованный, в частности, в отношении потребления морепродуктов (Thomsen et al., 2022). Альтернативную методику предложили Van der Fels-Klerx et al. (2018), применив библиометрическое агрегирование данных из Scopus, CAB Abstracts, Web of Science и PubMed для ранжирования угроз и приоритизации управленческих решений. Существенную роль в работе с разнотипными данными играют и методы многокритериального анализа, подробно описанные в отчётах FAO (2017). Эти подходы позволяют сопоставлять риски разной природы, но требуют высокой степени исходной структурированности данных. Новейшие попытки интеграции химических, микробиологических и нутритивных аспектов реализуются через форматы комбинированной оценки, получившие развитие в рамках оценки готовой продукции.

Существенный шаг к объединению различных групп рисков предпринят в исследовании Poissant et al. (2023), в котором предложен интегративный подход к ранжированию пищевых продуктов по микробиологическим, химическим и нутритивным рискам. Исследование опирается на данные французского агентства по безопасности продуктов питания, окружающей среды и охраны труда (ANSES, 2019) и охватывает широкий спектр готовых к употреблению блюд, содержащих мясо, птицу, рыбу, яйца, молочные продукты, зерновые, макароны, овощи, морские водоросли и разнообразные соусы. Продукция классифицировалась по типу термической обработки (стерилизация, пастеризация, заморозка, отсутствие обработки), а также с учётом упаковки, условий хранения и маркировки. В результате был сформирован перечень наиболее значимых загрязнителей, включая акриламид, ПАУ (например, бензофлуорен, дибензо[а, h]пирен), диоксины и ПХБ, пер- и полифторалкильные вещества, органобромированные соединения (α -, β -, γ -гексабромциклододекан), тяжёлые металлы (Al, V, Cr и др.), фитотоксины (например, генистеин), микотоксины (афлатоксины B1, B2, G1), добавки (нитриты, сульфиты, аннато), остатки пестицидов (бифентрин, карбендазим, диметоат), а также контаминанты из упаковки (например, бисфенол А). Несмотря на доступность предложенной схемы, сами авторы подчёркивают необходимость дальнейшей валидации и оценки

¹ Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» (с изменениями на 22 апреля 2024 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320560#7D20K3> (дата обращения: 01.02.2025).

универсальности предложенной модели для иных категорий продукции и других стран.

Настоящий обзор предметного поля направлен на восполнение существующего пробела путём систематизации сведений о химической контаминации готовой пищевой продукции. Особое внимание уделяется (1) основным источникам загрязнения, включая переработку загрязнённого продовольственного сырья; (2) современным данным о трансформационных и «новых» загрязнителях, обладающих потенциальной токсичностью; (3) стратегиям снижения уровней остаточных загрязнителей на разных этапах пищевой цепи; и (4) аналитическим подходам, используемым в научной практике и контролирующих структурах для идентификации и количественного определения загрязняющих веществ в сложных пищевых матрицах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Представленный обзор предметного поля выполнен с использованием протокола PRISMA-ScR. Протокол был зарегистрирован в Open Science Framework (<https://osf.io/rehd2>). Авторы подтверждают, что данная рукопись представляет собой прозрачный, точный и честный отчет о проведённом исследовании.

Поисковые стратегии

Базы данных

Поиск научной литературы осуществлялся по наиболее авторитетным базам данных научного цитирования Scopus, ScienceDirect, PubMed и РИНЦ на английском и русском языке.

Сведения о выявлении в продовольственном сырье и пищевой продукции остаточных содержаний химических загрязнителей получены с использованием Федеральной государственной информационной системы в области ветеринарии (Ветис, компонент «Веста»¹) и открытых данных отечественных и зарубежных компетентных ведомств в области обеспечения пищевой безопасности (Роспотребнадзор, Национальное агентство по безопасности пищевых продуктов, окружающей среды и охране труда Франции, *англ.* Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail — ANSES).

Ключевые слова и поисковый запрос

При поиске научной литературы использованы дескрипторы: chemical contamination (химическое загрязнение), chemical risk/hazards (химический риск/угрозы), food raw materials (продовольственное сырье), ready-to-eat products/dishes (готовые продукты/блюда), processed food (переработанная продукция). Сортировка осуществлялась по релевантности.

Углубленный поиск включал типы публикаций: Review articles, Research articles, Encyclopedia, Book chapters, Case reports, Discussion, Editorials, Mini reviews, News, Other; «Subject area»: Materials Science, Chemical Engineering, Chemistry, Agricultural and Biological Sciences, Veterinary Science and Veterinary Medicine. В связи с междисциплинарным характером научных работ по теме работы поиск в РИНЦ был ограничен несколькими направлениями: Химия, Пищевая промышленность, Сельское и лесное хозяйство, Рыбное хозяйство, Аквакультура, Биотехнология.

Процесс отбора

Полученные результаты поиска анализировались и отбирались в соответствии с протоколом PRISMA-ScR. На первом этапе исследования список публикаций, а также информация о них была загружена ручном формате по идентификатору DOI (в случае его отсутствия по названию, авторам, году, источнику) в менеджер ссылок "Mendeley", полные тексты статей были подгружены в формате .pdf. Далее, список публикаций в "Mendeley" был проверен на наличие дубликатов. Обнаруженные дубликаты были исключены. После исключения дубликатов статьи подвергались скринингу на соответствие критериям отбора в два этапа. Сначала анализ реализовывался по названию и аннотации, а затем по полному тексту. Все прошедшие отбор публикации далее были включены в обзор предметного поля.

Картографический анализ выполнен с использованием табличного редактора Excel компании Microsoft после импорта библиографических данных, выгруженных из менеджера ссылок "Mendeley" в XML-формате.

¹ «Веста» / Государственная информационная система в области ветеринарии «Ветис». <https://www.vetrif.ru/vetrif/vesta.html>.

Критерии включения источников

- (1) Сортировка и выбор источников осуществлён по релевантности и числу цитирований.
- (2) Доступность (возможность максимально полно ознакомиться с литературным источником).
- (3) Глубина архива — 15 лет.
- (4) Основные виды готовой продукции, для которых актуализирована информация: мясная, молочная, рыбная продукция и морепродукты; яйца; овощи и фрукты; орехи; зерновая продукция; продукция смешанного состава.

Критерии исключения источников

- (1) Исключены из результатов поиска учебные пособия и патенты.
- (2) Критерии поиска информации в научной литературе ограничены анализом данных за последние 5 лет о выявлении в продовольственном сырье и пищевой продукции остаточных содержаний химических загрязнителей.
- (3) В работе не принимали во внимание загрязнители, имеющие физическую и микробиологическую природу, а также попадающие в конечный продукт в результате преднамеренной фальсификации.

Извлечение данных

Из отобранных работ была извлечена следующая информация: имена авторов и информация о странах происхождения и типе публикации, цель и дизайн исследования, выводы, год публикации и DOI. Отобранные по названию и аннотации релевантные статьи анализировались полнотекстово (Приложение 1).

Синтез данных

Систематизация и обобщение данных проводились с использованием элементов картографического анализа, характерного для обзоров предметного поля. После удаления дублирующихся записей и исключения нерелевантных источников, отобранные публикации и документы были подвергнуты тематическому кодированию на основе трёх аналитических осей: (1) источники и механизмы химической контаминации, (2) меры контроля и снижения уровней загрязнения, (3) применяемые аналитические методы определения загрязнителей. Первичный обзор содержания проводился вручную, с предварительной категоризацией заголовков

и аннотаций, после чего выполнялся углублённый анализ полных текстов, если публикация соответствовала критериям включения.

Для визуальной организации и предварительной классификации использовались табличные средства Microsoft Excel. В частности, была реализована логика двумерного сопоставления: с одной стороны — тип продукта (мясное сырьё, готовая продукция, полуфабрикаты и др.), с другой — класс загрязнителя (антибиотики, ПАУ, мигранты из упаковки и др.). Дополнительно выделялись подкатегории по методу анализа (спектрометрия, хроматография, экспресс-методы и пр.) и типу используемой регуляторной базы (международная, национальная, ведомственная).

Отдельно обрабатывались данные мониторинга из системы «Ветис» (компонент «Веста») и отчётов компетентных ведомств, таких как Роспотребнадзор (РФ) и ANSES (Франция). Для сопоставления международных и отечественных практик контроля применялся принцип сквозного тематического кодирования, при котором выявленные категории загрязнителей отслеживались в разных источниках с фиксацией различий в частоте обнаружения, нормативных значениях и контексте применения аналитических методик.

Итоговый синтез результатов не преследовал цели количественной обобщающей оценки, а был направлен на структурное картографирование исследовательского поля, выявление лагун и закрепившихся направлений анализа, а также на формулирование направлений для последующего изучения. Этот подход соответствует целям обзора предметного поля и обеспечивает риторическую и жанровую согласованность между структурой исследования и его задачами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Поиск и отбор источников

В результате систематического поиска по базам данных Scopus, ScienceDirect, PubMed и РИНЦ было первоначально найдено 2949 публикаций, соответствующих критериям поиска (Scopus — 402, ScienceDirect — 390, PubMed — 1848 и РИНЦ — 309), из них отобрано 208 публикаций, потенциально соответствующих целям обзора. На этапе предварительной фильтрации были исключены 21 работа: 13 из-за отсутствия доступа к полному тексту и 8 ввиду несоответствия жанровым

критериям (включая патенты и учебные пособия). После удаления в менеджере ссылок "Mendeley" (Action: Keep this reference only) 5 дубликатов (ScienceDirect и PubMed) к этапу скрининга по названиям и аннотациям было допущено 182 публикаций, из которых исключено ещё 11 по причине тематического расхождения. На стадии полнотекстового анализа 8 публикаций были исключены как не соответствующие контексту

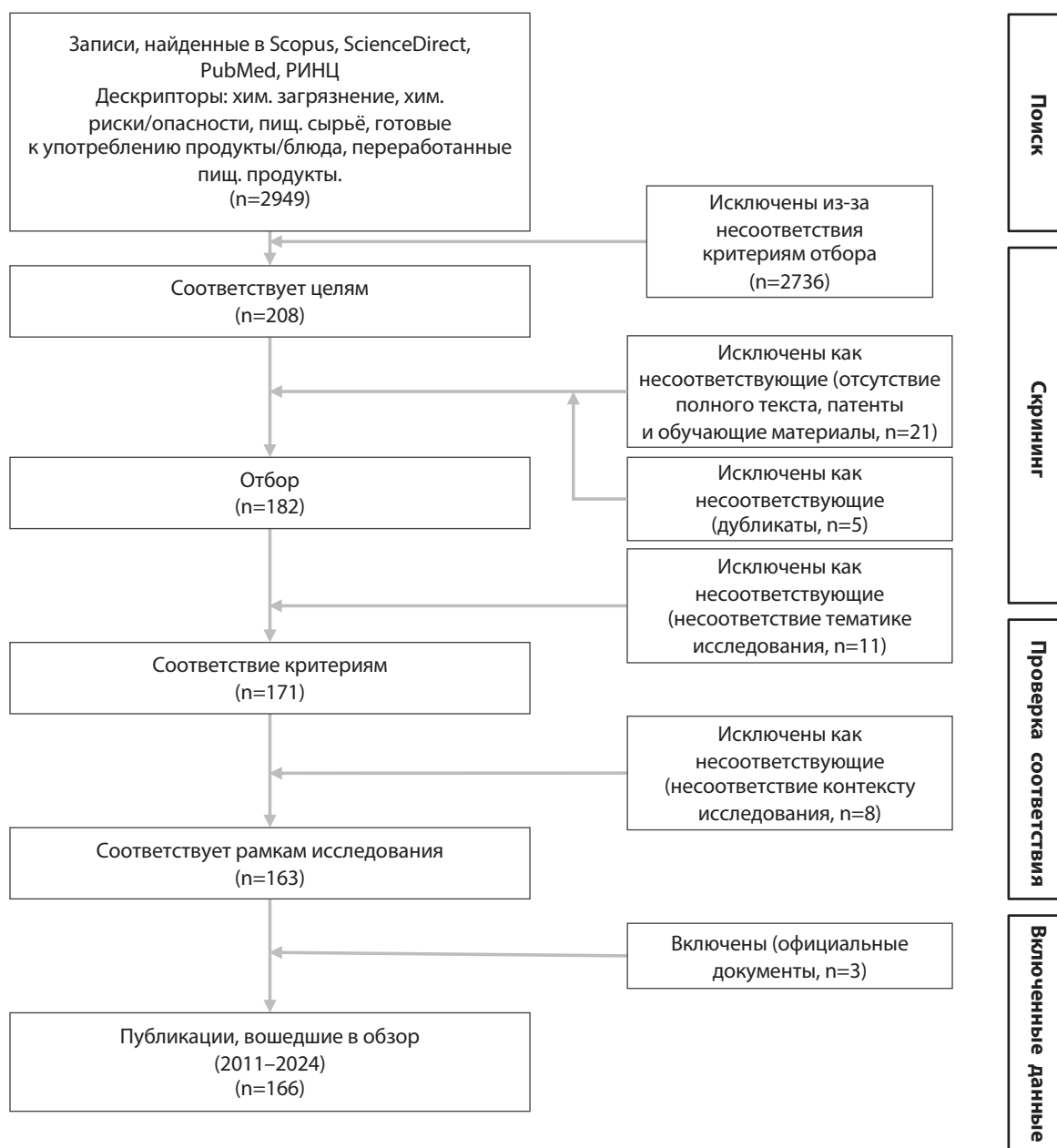
исследования. Дополнительно были включены 3 целевых отчёта международных организаций (FAO, WHO), отобранные по результатам анализа пристатейных библиографических списков. Итоговая выборка составила 166 источников, из которых 84,7% представляют собой рецензируемые статьи, опубликованные в научных журналах. Диаграмма отбора источников представлена на Рисунке 1.

Рисунок 1

Диаграмма PRISMA

Figure 1

PRISMA Flowchart



Характеристики корпуса публикаций

Анализ временного распределения публикаций показывает, что 86,5 % источников опубликованы в последние десять лет (2014–2024 гг.), причём пик приходится на 2023 год (16,6 %). Географическая структура авторства охватывает 42 страны. Наиболее продуктивными оказались исследовательские коллективы из Китая (13,0 %), России (11,2 %) и США (8,7 %), за которыми следуют Испания (6,7 %) и Италия (6,2 %). Международные авторские коллективы представлены в 5 % публикаций. Визуальное распределение стран-источников отражено на Рисунке 2.

Первичные аффилиации авторов большинства публикаций относятся к академическим учреждениям — университетам и исследовательским институтам. Вместе с тем в корпусе присутствуют и документы, подготовленные профильными государственными ведомствами и аналитическими центрами (3,6 %), что расширяет спектр типов источников.

Структура и логика тематического синтеза

Содержание включённых публикаций было подвергнуто структурному тематическому кодированию по трём ключевым аналитическим направлениям: (1) источники загрязнения, (2) стратегии снижения контаминации, (3) применяемые методы анализа. Такой подход позволил осуществить двухуровневую классификацию данных по типам продукции и классам загрязнителей. Для визуализации была составлена аналитическая матрица (см. Таблица 2), в которой отражены типовые сочетания объектов анализа и типов загрязнителей.

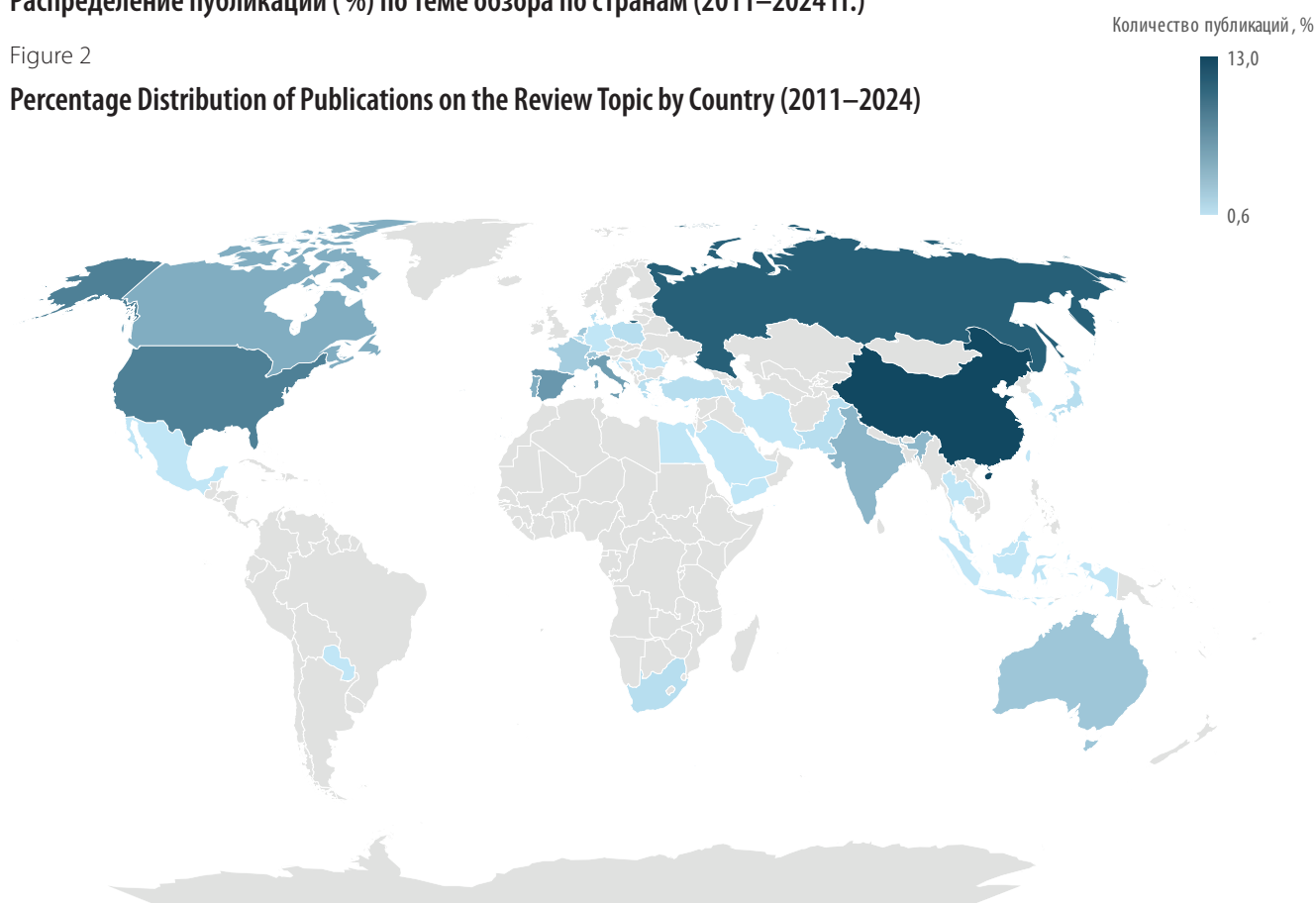
Ниже приведены результаты тематического синтеза, сгруппированные по происхождению загрязнителей: из сырья, образующиеся при переработке, поступающие из упаковки, а также обусловленные условиями хранения и комплексным составом продукции. В каждом блоке обсуждаются наиболее часто выявляемые вещества, их механизмы поступления в продукцию и существующие аналитические подходы к их обнаружению. Также

Рисунок 2

Распределение публикаций (%) по теме обзора по странам (2011–2024 гг.)

Figure 2

Percentage Distribution of Publications on the Review Topic by Country (2011–2024)



О.И. Лаврухина, Д.А. Макаров, Е.С. Козеичева, Т.В. Балагула, А.В. Третьяков, М.А. Гергель, Е.А. Лозовая

приводятся данные официального мониторинга за 2020–2024 гг. (ГИС «Ветис», компонент «Веста») и ключевые выводы из научных публикаций, вошедших в обзор.

Таблица 2

Потенциальные загрязнители готовой к употреблению продукции, содержащей ингредиенты животного происхождения

Table 2

Potential Contaminants of Ready-to-Eat Products Containing Animal-Derived Ingredients

Продукция	Группа загрязнителей / Загрязнитель
Мясная продукция	
Колбасы, сосиски и сардельки	Хинолоны, тетрациклины, сульфаниламиды
Равиоли, чебуреки, лазанья мясная	
Мясо сушеное (мясные снеки), карпаччо	
Молочная продукция	
Сырки творожные, творожная масса, сырники, блинчики и вареники с творогом	Тетрациклины, сульфаниламиды
Сыры и творог (5 % и более)	
Мороженое (12–15 % жирности)	Тетрациклины, линкозамины
Масло сливочное (жирность 72,5 % и выше)	Тетрациклины, хинолоны, амфениколы
Сгущенное молоко, сливки	Сульфаниламиды, линкозамины, хинолоны, макролиды
Йогурт, кефир, снежок (жирность 2,5–3,2 %)	Тетрациклины, сульфаниламиды, свинец
Рыбная продукция	
Суши, роллы, салаты, готовые вторые блюда ¹	Трифенилметановые красители: малахитовый зелёный, кристаллический фиолетовый, бриллиантовый зелёный
Риет, салаты, пельмени, вторые блюда ²	Мышьёк
Кондитерские изделия	
Бисквиты и пирожные бисквитные	Хинолоны и сульфаниламиды
Продукция с добавлением меланжа (кондитерская, соусы и т.д.)	Хинолоны, сульфаниламиды, ионофоры

Примечание. ¹ Продукция, изготовленная из искусственно выращенной рыбы и морепродуктов: креветок, мидий, карпа, карася, форели радужной, осётра; ² Продукция, изготовленная из выловленной рыбы и морепродуктов: тресковых рыб (трески, наваги, пикши, путассу), камбалы и палтуса, креветок, крабов.

Note. ¹ Products made from farmed fish and seafood: shrimp, mussels, carp, crucian carp, rainbow trout, sturgeon. ² Products made from wild-caught fish and seafood: codfishes (cod, navaga, haddock, blue whiting), flounder and halibut, shrimp, crabs.

Группы загрязнителей

Загрязнители, поступающие с продовольственным сырьем

В настоящее время актуальна проблема контроля остаточных содержаний в продукции антибактериальных веществ. Антибиотики, систематически поступающие в организм человека с пищей даже в количествах меньше МДУ, способствуют усилению устойчивости микрофлоры, в т.ч. патогенной, к антибактериальным препаратам (Capita & Alonso-Calleja, 2013). К критически важными в ветеринарии группам «Всемирная организация охраны здоровья животных» (ВОЗЖ — ранее МЭБ, OIE) относит аминогликозиды, аминогликозиды, амфениколы (флорфеникол и тиамфеникол), цефалоспорины III (цефоперазон, цефтиофур, цефтриаксон) и IV поколения (цефкином), макролиды, пенициллины, фторхинолоны, сульфаниламиды и тетрациклины¹. Законодательно регламентируемые пределы МДУ препаратов как правило установлены для сырья (мясо, печень, жир, рыба, молоко и т.д.).

Среди антибактериальных препаратов по количеству обнаружений в 2020–2021 гг. (ГИС Ветис, компонент «Веста») в продукции животноводства чаще других обнаруживали превышения МДУ хинолонов, тетрациклинов, сульфаниламидов (Балагула и соавт., 2023). Анализ обнаружений за 2020–2024 гг. показал сохранение данной тенденции: превалирует выявляемость представителей тетрациклинов, фторхинолонов, пенициллинов, амфениколов и сульфаниламидов. В продукции птицеводства и яйцах максимальное количество обнаружений установлено для фторхинолонов, в мясе и мясной продукции (кроме птицы) на первом месте также фторхинолоны, далее следуют тетрациклины и сульфаниламиды (См. Диаграмму 1).

В молоке и молочной продукции чаще всего обнаруживаются превышения МДУ тетрациклинов, пенициллинов и амфениколов, далее следуют в порядке убывания линкозамиды, хинолоны, сульфаниламиды и макролиды.

Необходимо отметить, что антибиотиками может быть загрязнена не только продукция животноводства, но также вода и растительное сырьё (Макаров и соавт., 2023).

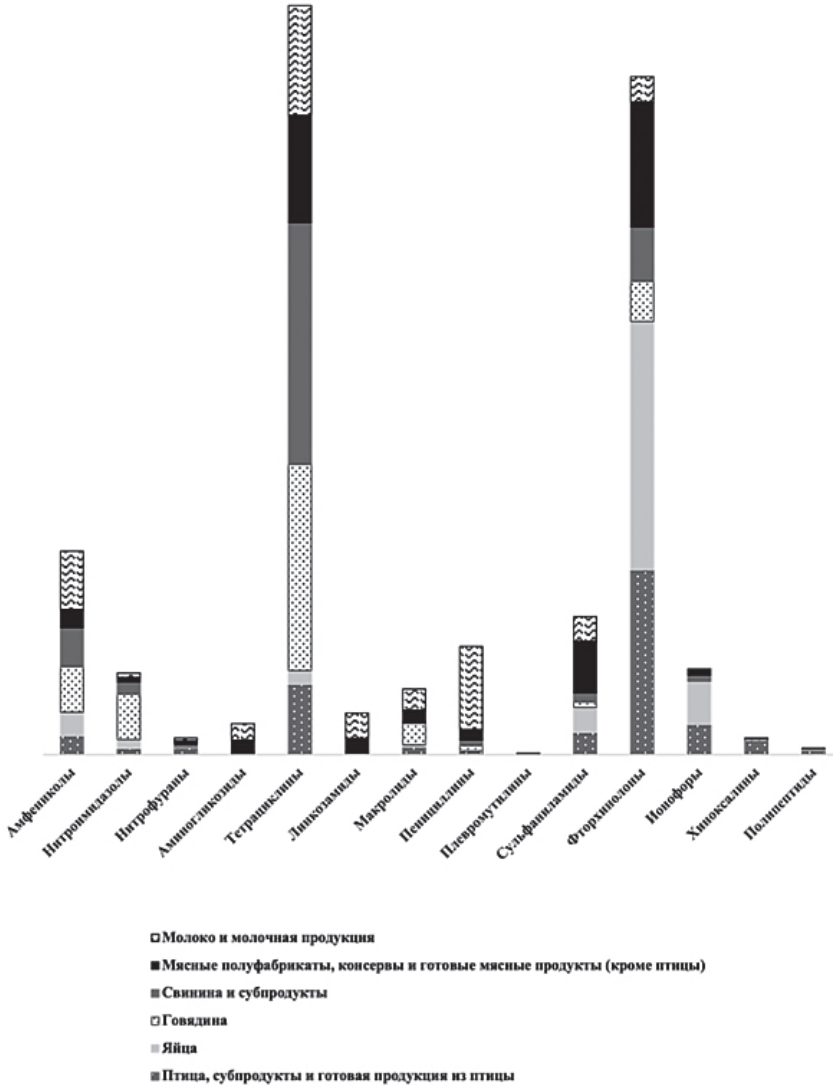
При приготовлении пищи остатки лекарств удаляются не всегда (не полностью). Анализ литературных дан-

¹ OIE list of antimicrobial agents of veterinary importance (June 2021). <https://www.woah.org/app/uploads/2021/06/a-oie-list-antimicrobials-june2021.pdf>.

О.И. Лаврухина, Д.А. Макаров, Е.С. Козеичева, Т.В. Балагула, А.В. Третьяков, М.А. Гергель, Е.А. Лозовая

Диаграмма 1
**Выявления (%)¹ антибиотиков в продукции животноводства
в 2020–2024 гг. (ГИС Ветис, компонент «Веста»)**

Chart 1
**Detections (%)¹ of Antibiotics in Livestock Products in 2020–2024
(GIS Vetis, “Vesta” Component)**



Примечание. ¹Выявления, % — обнаружение превышения МДУ содержаний антибиотиков в продукции.
Note. ¹Detections, % — instances where antibiotic residue levels in products exceed the maximum residue limit (MRL).

ных показывает, что при изготовлении вареных колбас не происходит значительного разрушения антибиотиков (Приложение 2).
Наличие остаточных количеств антибактериальных препаратов в продовольственном сырье и готовой

продукции обуславливает угрозу их попадания в продукцию, содержащую компоненты животного происхождения и не подвергающуюся длительной термической обработке. При изготовлении пирогов, пиццы, шаурмы и другой аналогичной по составу и способу

изготовления мясосодержащей продукции в принципе не происходит механического удаления контаминантов, ввиду отсутствия необходимых для этого производственно-технологических стадий.

Актуальные зарубежные исследования демонстрируют наличие в готовой продукции (яичном тофу, фрикадельках из креветок, куриных наггетсах и ветчине) кроме антибиотиков остаточных содержаний β -агонистов и кокцидиостатиков (большинство положительных проб — мясо птицы и продукты его переработки, яйца и яичные продукты) (Sin et al., 2023). Но работ относительно переноса и трансформации в готовой продукции представителей других групп лекарственных препаратов для животных (антгельминтиков, гормонов, нестероидных противовоспалительных препаратов и др.) пока крайне мало.

Пестициды и продукты их трансформации

Хлорорганические пестициды (ХОП) отличаются высокой устойчивостью к разложению, и несмотря на запрет «Стокгольмской конвенцией о стойких органических загрязнителях» (с дополнениями 2017 г.) использования ГХЦГ (α -, β -, γ -изомеры) и ДДТ (и его метаболиты) обнаруживаются в количествах выше МДУ в объектах окружающей среды. Однако проблема загрязнения пестицидами характерна и для животноводческого сырья, в результате их попадания в организм животных с кормами, либо непосредственного использования инсектицидов и дезинфицирующих средств (Jia et al., 2024). Пестициды, особенно запрещённые к применению ХОП и некоторые их метаболиты (ДДТ и ДДЕ, ДДД; ГХЦГ и моно-, ди-, три-, тетрахлорфенолы), благодаря своей липофильности способны накапливаться в молоке, яйцах и других продуктах с высоким содержанием жиров (Киш и соавт., 2022; Jia et al., 2024; Jooste et al., 2014).

Современные поколения пестицидов характеризуются меньшей стойкостью с окружающей среде, в том числе последние поколения фосфорорганических пестицидов (ФОП), карбаматы, неоникотиноиды и пиретроиды (Gallardo-Ramos et al., 2024) (Приложение 3). Однако, некоторые их представители согласно данным Pesticide Action Network входят в список особо опасных, а именно диазинон, хлорпирифос, диметоат, имидаклоприд, малатион, спиносад¹. Они быстро разлагаются,

но при этом стойкими и токсичными могут быть продукты их трансформации. Примерами в данном случае являются некоторые галогенсодержащие пиретроиды: при их разложении вследствие молекулярной рекомбинации с углеводородами высвобожденных галогенов возможно образование диоксинов и фуранов (Albaseer, 2019). Метаболиты фенилпиразола фипронила — фипронил сульфон и фипронил десульфенил, демонстрируют более высокую токсичность в экспериментах *in vitro* (Jia et al., 2024)). В случае ФОП токсичны продукты трансформации хлорпирифоса (3,5,6-трихлоро-2-пиридинол), диметоата (ометоат) и малатиона (малаоксон и изо-малатион) (Киш и соавт., 2022).

Нормативные значения МДУ пестицидов, как и других загрязнителей, применяются в большей мере для контроля сырья. В случае переработанной продукции и готовых блюд может оказаться значимым коэффициент переработки (Albaseer, 2019). Например, с учётом технологических коэффициентов в работе (Constantinou et al., 2021) установлено превышение МДУ пестицидов (от 2 до 24 соединений из 55 аналитов) во всех образцах изюма, кроме полученных из винограда, выращенного в условиях органического земледелия. Потеря воды в процессе приготовления приводит к уменьшению массы пищевых продуктов в пересчёте на сырой вес. Это касается не только растительного, но и животного сырья. Однако в случае переработки сырья с дальнейшим внесением других ингредиентов в процессе приготовления возможно напротив снижение содержания пестицидов в пересчёте на вес готового продукта в результате разбавления.

Термическая обработка продукции животноводства (мяса, молока, яиц) недостаточно эффективна для удаления стабильных пестицидов из растительной продукции. Варка не влияет на содержание ХОП в овощах и фруктах, так как они обладают липофильными свойствами и концентрируются в восках на поверхности кожицы. Для удаления из мяса ХОП и ФОП (ГХЦГ, ДДТ, эндосульфана, диметоата и малатиона) эффективнее проварка, чем запекание, что свидетельствует о большем влиянии процесса испарения летучих пестицидов (Djordjevic & Djurovic-Pejcev, 2016). Синтетические пиретроиды также термически стабильны (до 300 °C для некоторых представителей) (Albaseer, 2019). При этом

¹ List of highly hazardous pesticides. (2024, December). Pesticide Action Network International. https://pan-international.org/wp-content/uploads/PAN_HHP_List.pdf

для удаления из абрикосов, изюма, чернослива более 50 % от исходного содержания диметоата и ипродиона достаточно сушки на солнце или в духовом шкафу.

Снижение содержания пестицидов в процессе переработки, в зависимости от особенностей их строения и физико-химических свойств, возможно не только термической деструкцией, но также промывкой, гидролизом, окислением либо восстановлением, фотолизом, испарением, ферментацией (Djordjevic & Djurovic-Pejcev, 2016). Основными путями деградации пиретроидов перметрина, цифлутрина, циперметрина и дельтаметрина в винограде и апельсиновом соке являются гидролиз и окисление (Albaseer, 2019). Значительного снижения концентрации некоторых пиретроидов, в частности бифентрина в пшенице, можно добиться молочнокислой ферментацией (дрожжевая ферментация и стерилизация демонстрируют низкую эффективность). Ферментация с использованием *Saccharomyces cerevisiae* (пекарских дрожжей) приводит к полному разложению дельтаметрина, перметрина и фенвалерата (Albaseer, 2019). Для удаления пиретроидов высокоэффективна также фотодегградация (применима в основном для исходного сырья). Термической обработкой и ферментацией возможно значительно (до ~97 %) снизить содержание фосфорорганических пестицидов в йогурте (Rana et al., 2019).

Пестициды, обладающие ограниченной подвижностью и проникающей способностью, можно эффективно удалить с помощью промывки. Её эффективность зависит от их растворимости в воде и других растворителях (растворах уксусной кислоты, хлорида натрия, карбоната натрия и т.д.) и условий промывки (температуры воды, pH, времени, проточная вода или нет). Промывкой проточной водопроводной водой можно полностью удалить из шпината манкоцеб, манеб, пропинеб и азоксистробин, 78 и 86–89 % дитионана и хлорантраципилола в баклажанах, 63 % хлорпирифоса в огурцах (в течение 20 мин) (Djordjevic & Djurovic-Pejcev, 2016). Однако снизить содержание хлорпирифоса в спарже удалось лишь на 24 %, линдана, альдрин и эпоксида гептахлора — на 10–12 %, а хлорпирифоса, ДДТ, циперметрина и хлорталонила в капусте — на 15–19 %. Кислотные растворы эффективны для удаления ХОП из картофеля, нейтральные и щелочные — для удаления ФОП.

Аллергены

Пищевая аллергия является специфической проблемой в сфере обеспечения пищевой безопасности. Реакция на пищевые аллергены у 2–3 % взрослого населения и 8 % детей варьируется от легких симптомов до крайне тяжелых форм (анафилактический шок) (Planque et al., 2016). В контроле продуктов питания с соответствующей маркировкой необходимы максимально чувствительные и специфичные методы, т.к. принципиально отсутствие даже следовых количеств аллергенов.

Наиболее характерные загрязнители белковой природы, вызывающих аллергические реакции, это глютен и аллергены соевых бобов, арахиса, пшеницы, орехов, молока, яиц, ракообразных и моллюсков, рыбы, ракообразных, сельдерея, горчицы, кунжута (FAO/WHO, 2013; Vidaček, 2013). Основные аллергены рыбы — парвальбумины, их более тридцати; в ракообразных и моллюсках преимущественно тропомиозины (FAO/WHO, 2013), реже аргининкиназа, киназа легких цепей миозина и саркоплазматический кальций-связывающий белок. В аллергической форме проявляется пищевое отравление рыбой, содержащей гистамин, который образуется при её неправильном хранении (Vidaček, 2013).

Пищевые добавки небелковой природы также могут вызывать аллергические реакции, например используемые против образования чёрного налёта на креветках сульфиты (Vidaček, 2013). Воздействие микро- и нанопластика на иммунную систему может потенциально приводить к снижению или повышению её активности, и как следствие к аллергическим реакциям (CONTAM, 2016a).

Основные аллергены должны быть указаны на этикетке, даже будучи второстепенными ингредиентами. Для обработки и снижения аллергического потенциала сои существует множество традиционных методов: термическая обработка, ферментация, ферментативный катализ, экструзия при высоком содержании влаги, гликозилирование, действие высокого гидростатического давления, ультразвука, импульсного ультрафиолетового излучения, холодной плазмы, взаимодействия с полифенолами (Z. Huang et al., 2023). Сочетание термической обработки, давления и ферментативного гидролиза под воздействием ультразвука перспективно для снижения аллергенных свойств арахиса вплоть до их полного устранения (Cuadrado et al., 2023). Для уменьшения аллергенности креветок чаще всего применяется ультразвук (Dong & Raghavan, 2022).

Биотоксины

Морепродукты являются потенциальным источником биотоксинов. К группе морских токсинов относятся сакситоксин и его аналоги (паралитический яд моллюсков), домоевая кислота (амнестический яд), окадаевая кислота (диаретический яд), динофизистоксины, пектенотоксины, азаспирациды, йессотоксины, бреветоксины, палитоксины, сигуатоксины, тетродотоксины (яды рыб семейства иглобрюхих) и другие нейротоксины (Abraham & Rambla-Alegre, 2017; Vidaček, 2013). В основном, кроме непосредственного синтеза ядов при формировании механизмов защиты в организме рыб, морские биотоксины вырабатываются водорослями или фитопланктоном (Vidaček, 2013). Они способны накапливаться в пищеварительных железах моллюсков. Кроме того, их попадание в водоемы приводит к накоплению фикотоксинов в рыбе (Morua et al., 2020). Наибольшее количество отравлений среди морских биотоксинов отмечается для паралитических ядов моллюсков, а именно сакситоксином и его аналогами (Leal & Cristiano, 2022).

Сигуатоксины являются метаболитами гамбиертоксинов (вырабатываемых донными водорослями *Gambierdiscus* и *Fukuyoa*) в организме рыб, обитающих в водах тропических районов центральной части Тихого океана, западной части Индийского океана и Карибского моря (Soliño & Costa, 2018). Они липофильны, накапливаются во всех тканях, особенно в икре и печени, с биомагнификацией на более высоких трофических уровнях (Soliño & Costa, 2018; Vidaček, 2013). Липофильными свойствами обладают также окадаевая кислота, динофизистоксины, пектенотоксины, азаспирациды, бреветоксины и йессотоксины (Abraham & Rambla-Alegre, 2017).

Донные водоросли и некоторые цианобактерии продуцируют гамбиертоксины из которых синтезируются полиэфирные токсины майтотоксин, гамбиерол и его производные гамбиероксид, гамбиерон и гамбиериновые кислоты (Soliño & Costa, 2018). Майтотоксин водорастворим, поэтому не должен накапливаться в организме рыб, однако есть упоминания об его переносе на более высокие трофические уровни (Kohli et al., 2014). Гидрофильными свойствами обладают и паралитические яды, в том числе сакситоксин (Abraham & Rambla-Alegre, 2017). Благодаря развитию аналитических методов в последние годы были обнаружены новые аналоги сакситоксина, однако о токсикокинетике большинства из них пока практически ничего не известно (Leal & Cristiano, 2022).

Большинство морских токсинов устойчивы к нагреванию и не инактивируются при приготовлении пищи (Özogul & Hamed, 2018; Vidaček, 2013). Возможность образования гистамина можно исключить, обеспечив свежесть сырья и правильные температурные условия хранения (при высокой температуре рост продуцирующих гистамин бактерий происходит быстрее) (Vidaček, 2013).

Некоторые из наиболее токсичных биологически активных соединений содержатся также в растениях и грибах — это фитотоксины и алкалоиды. Растения синтезируют пирролизидиновые и тропановые алкалоиды, являющиеся частой причиной отравления животных и людей, например 1,2-дегидропирролизидиновые (Stegelmeier et al., 2016). Потенциально токсичны и растения, содержащие цианогенные гликозиды (горький миндаль, косточки абрикоса, вишни, сливы и т.д. — при гидролизе может выделяться HCN) (Eumar et al., 2016). Кроме цианогенных гликозидов растительных ядов огромное разнообразие (сапонины, глюкозинолаты, фитогемагглютинины, рицин, нейротоксичные аминокислоты), но в рамках данной работы наибольший интерес с точки зрения обеспечения безопасности пищевой продукции подкласса алкалоидов: тропановые и пирролизидиновые.

Алкалоиды спорыньи продуцируются грибами *Claviceps purpurea* и представляют собой смесь токсичных родственных по структуре соединений (Haque et al., 2020). В большинстве случаев контаминация алкалоидами зерновых культур является проблемой животноводства. Корма могут содержать эрготамин, эргометрин, эргокristин, эргокриптин, эргокорнин и эргозин (Grusie et al., 2018). Для оценки уровней контаминации сырья и готовой продукции алкалоидами и продуктами их трансформации необходимо внедрение в рутинную практику современных подходов и методов, а также проведение с их использованием целевых исследований в рамках мониторинга безопасности пищевой продукции.

Загрязнение на этапе производства (изготовления) и хранения

В процессе жарки, выпечки, запекания в духовке, приготовлении на гриле, варки, консервирования, гидролиза или ферментации могут образовываться токсичные соединения, такие как акриламид, нитрозамины, гетероциклические амины, хлорпропанола, фураны, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)

и этилкарбамат (Edna Hee et al., 2024; Nerín et al., 2016; Stadler & Theurillat, 2017). Благодаря уникальным антипригарным свойствам, термостойкости и относительно низкой стоимости в качестве покрытия для кухонной посуды используется политетрафторэтилен (Smith & Kim, 2017). При этом перфторалкильные соединения могут проникать в пищевые продукты в процессе приготовления.

Готовая к употреблению продукция смешанного состава («Ready-to-Eat»), подвергавшаяся обработке, кроме загрязнителей из сырья может содержать пищевые добавки опасные для здоровья и производственные загрязнители: моноклорпропандиол (МХПД) и глицидол, акриламид, нитрозамины, ПАУ; загрязнители образующиеся при нарушении условий хранения: микотоксины и биогенные амины; и из упаковочных материалов: перфторированные и полифторированные соединения, БФА, фталаты, микропластик и нанопластик, металлы и металлоорганические соединения (Nerín et al., 2016; Poissant et al., 2023; Vitali et al., 2023).

Пищевые добавки

Применение добавок в производстве экономически целесообразно, а кроме того, позволяет во многих случаях избежать пищевых отравлений и токсикоинфекций как человека, так и животных. В одном из наиболее полных обзоров о токсичности пищевых добавок (Kumar et al., 2019) выделено 16 их функциональных классов и представлена информация об их токсических эффектах. Перечень запрещённых к применению в РФ и ЕАЭС пищевых добавок обширен, а с 27 февраля 2024 г. вступил в силу запрет ещё 19 соединений¹ и перечень разрешённых ТР ТС 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств» сократился до 349 позиций.

В рамках данной работы интерес представляют разрешённые добавки, потенциально вносящие наибольший суммарный вклад в контаминацию готовой продукции смешанного состава при одновременном загрязнении сырья и различных ингредиентов. В первую очередь речь идёт о металлах в различных формах. Оксиды и гидроксиды железа (E172), диоксид титана (E171), серебро (E174) используются в качестве красителей. Металлы не разлагаются в процессе приготовления, не подвержены биодegradации и способны накапли-

ваться и в растительном, и в животноводческом сырье и продукции.

Вторая группа по значимости в данном случае — анионы. Фосфаты являются неотъемлемой частью рациона человека: органические формы фосфатов содержатся в мясе, зерновых, молочных продуктах и орехах, и неорганические фосфаты — в пищевых добавках (Dykes et al., 2019). Чрезмерное потребление фосфатов приводит к вредным последствиям для живых организмов. Фосфаты (E339) применяются в качестве консервантов для мяса, стабилизаторов и солей при плавлении сырных продуктов, эмульгаторов в мясных полуфабрикатах и сыре, а кроме того, диспергатора белка при производстве сухих молочных продуктов. При переработке рыбной продукции для уменьшения потери естественной влаги также используют фосфаты (Vidaček, 2013). Как правило это креветки, замороженное рыбное филе или сурими. Фосфаты легко всасываются в тонком кишечнике и накапливаются в клетках и костях (Dykes et al., 2019).

Анионы могут образовывать в процессе приготовления пищи токсичные соединения. При взаимодействии в кислой среде аминов с нитрит-ионами образуются нитрозамины. Нитриты (E249 и E250) и нитраты (E252 и E251) калия и натрия являются основными ингредиентами при консервировании вяленых мясных продуктов и одновременно выполняют роль красителей (El-Saber Batiha et al., 2021). Нитриты используются и в качестве консерванта и закрепителя цвета для рыбы (Vidaček, 2013). Нитрит калия подавляет рост *Clostridium botulinum*, часто применяется для вяленой рыбы и в процессе копчения. Установлена взаимосвязь между использованием нитритов и нитратной селитры и безопасностью мяса и мясной продукции (Y. Zhang et al., 2023).

Использование в пищевой промышленности для предотвращения порчи и снижения микробиологической контаминации в качестве добавок природных биологически активных компонентов, а именно экстрактов трав и специй, эфирных масел, бактерий и ферментов, позволит избежать использования синтетических добавок и консервантов и снизить риск контаминации готовой продукции пестицидами и антибиотиками (El-Saber Batiha et al., 2021). Природные антиоксиданты:

¹ Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 29 августа 2023 г. № 84. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302614036>.

каротиноиды, токоферол (витамин Е), некоторые фенольные соединения и аскорбиновая кислота. В работе (Y. Zhang et al., 2023) отмечается невозможность в настоящее время заменить нитриты и нитраты при производстве мясной продукции, поэтому существует необходимость поиска альтернативных добавок, либо других эффективных методов замены нитритов при переработке мяса.

Сахар способен стимулировать рост культур пробиотических бактерий, например *Lactobacillus* spp. и подавлять рост некоторых патогенных микроорганизмов *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus* spp. и *Enterobacteria* spp., однако с точки зрения здорового питания, это не самый подходящий вариант предотвращения контаминации (El-Saber Batiha et al., 2021). В таком случае могут быть перспективны препараты животного происхождения, а именно хитозан, лизоцим, лактопероксидаза и лактоферрин, а также биологически активные соединения некоторых съедобных грибов.

МХПД и глицидол

3-МХПД, 2-МХПД и глицидиловые эфиры жирных кислот — распространенные загрязнители жиросодержащей пищевой продукции, образующиеся в процессе переработки пищевых продуктов, в частности, при рафинировании и дезодорировании растительных масел при высоких температурах (~200°C). В продуктах с невысоким содержанием жира, которые в процессе производства подвергаются высокотемпературной обработке или, например, кислотному гидролизу (жидкие приправы, хлебобулочные изделия, кислотные гидролизаты растительных белков и др.), они чаще присутствуют в свободном виде (Crews et al., 2013). В рафинированных пищевых маслах и пищевых продуктах, изготовленных с их использованием, МХПД присутствуют главным образом в виде этерифицированных (связанных с жирными кислотами) форм: симметричных и ассиметричных ди- и моноэфиров (Leigh & MacMahon, 2017). Глицидол — это трёхатомное органическое соединение с эпоксидной и спиртовой функциональными группами (CONTAM, 2016b). В рафинированных маслах и содержащих их продуктах он существует в виде моноэфиров жирных кислот. Неочищенные (нерафинированные) масла в норме не содержат глицидол и МХПД, но содержат соединения, являющиеся их предшественниками (Pudel et al., 2011).

Из липидных компонентов предшественниками монолорпропандиолов могут быть по разным данным три-, ди- и моноглицериды (ТАГ, ДАГ и МАГ), а также свободный глицерин (CONTAM, 2016b; FAO/WHO, 2013). При этом ДАГ и МАГ могут иметь как природное, так и технологическое происхождение в условиях высокотемпературной очистки (CONTAM, 2016b). Глицидиловые эфиры, как правило, образуются из диацилглицеринов и этот процесс протекает в прямой зависимости от продолжительности воздействия высоких температур.

В работе (Goh et al., 2021) показано, что на образование 3-МХПД и глицидиловых эфиров жирных кислот в процессе жарки и выпечки продуктов с растительным маслом, влияют температура, способ и продолжительность обработки, масло и другие компоненты продукта, влажность, содержание хлора, содержание антиоксидантов в жировой фракции продукта при выпечке. Для глицидиловых эфиров рафинированное масло — единственный обнаруженный источник их попадания в пищу (CONTAM, 2016b). Свободный 3-МХПД образуется и в других технологических процессах жарки, выпечки и копчения, гидролиза белка с добавлением соляной кислоты при высокой температуре. В наибольшей концентрации загрязнители выявляют в пальмовом масле, богатом предшественниками глицидиловых эфиров — диацилглицеридами.

3-МХПД нейротоксичен, глицидол также проявляет нейротоксичность, но кроме того обладает выраженной канцерогенной активностью. В странах Евросоюза мониторинг продуктов питания на наличие глицидиловых эфиров жирных кислот, 2,3-МХПД и их эфиров проводится в рамках выполнения Commission Recommendation 2014/661/EU. Исследуется продукция, содержащая растительные масла, хлебобулочные изделия, консервированные мясо и рыба, детское питание и т.д.

В работе (CONTAM, 2016b) было показано, что наибольший вклад в воздействие 3-МХПД и глицидола на население Европы вносят кондитерские изделия и маргарин. Значителен и вклад картофеля фри, чипсов и жареного мяса (последнее только в отношении 3-МХПД). Эти исследования стали основой при разработке нормативов предельного содержания этих веществ в отдельных видах пищевой продукции (Commission Regulation (EU) 2020/1322), внесенных в Commission Regulation (EU) 1881/2006, устанавливающий максимальные уровни контаминантов в пищевых продуктах. Решение ЕЭК

06.08.2019 № 132 с допустимыми уровнями содержания 3-МХПД и глицидола в продукции на территории Российской Федерации пока не вступило в силу.

Для снижения содержания в пищевых продуктах глицидиловых эфиров и эфиров 3-МХПД согласно рекомендациям Продовольственной федерации Германии (*пред.* German Federation for Food Law and Food Science, BLL) необходимы выбор подходящего сырья для производства масел (наиболее высокое содержание — в рафинированном пальмовом масле, наименьшее — в рапсовом (CONTAM, 2016b) или снижение предшественников загрязнителей перед обработкой; изменение условий и внедрение дополнительных этапов рафинирования масла; снижение количества эфиров в рафинированном масле путем использования подходящих адсорбентов. Международная Комиссия Кодекс Алиментариус в 2019 г. опубликовала свод указаний СХС 79–2019 по минимизации загрязнения жиров и изготовленной из них продукции с аналогичными общими принципами.

Акриламид

По данным Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов (European Food Safety Authority, EFSA) картофельные, хлебные и кукурузные чипсы, картофель фри, крекеры, тосты, печенье, хлопья для завтрака, хлеб и хлебобулочные изделия, кофе и какао являются основными источниками появления акриламида в рационе (Fan et al., 2023). В его образовании при высокотемпературной обработке (выше 120 °C) участвуют редуцирующие сахара и аминокислоты: в картофеле глюкоза и фруктоза, а в зерновых продуктах свободный аспарагин (Passos et al., 2018). Акриламид обнаружен также в термически обработанных блюдах с оливками (запечённых) и лекарственных средствах растительного происхождения (сырьё подвергалось нагреванию в процессе сушки) (Duedahl-Olesen et al., 2022). На процесс его образования кроме температуры влияют время приготовления, pH, тип масел/жиров и активность воды (A_w , отношение давления паров воды над продуктом к давлению паров над чистой водой при той же температуре) (Edna Hee et al., 2024). Авторами работы (Duedahl-Olesen et al., 2022) подтверждены полученные ранее другими исследователями данные об увеличе-

нии содержания акриламида при запекании оливок и значительном его снижении при дальнейшей, более длительной термической обработке, но отмечается, что при этом они становятся качественно неприемлемыми для употребления. Содержание акриламида в приготовленных продуктах, богатых углеводами, в 30–80 раз выше, чем в приготовленных продуктах, богатых белками (Edna Hee et al., 2024).

Акриламид водорастворим, интенсивно всасывается из ЖКТ и метаболизируется до глицидамида (2,3-эпоксипропанамид), демонстрирующего генотоксичность в тестах *in vitro* (Edna Hee et al., 2024; Stadler & Theurillat, 2017). Согласно оценке МАИР безопасный уровень его потребления составляет 1 мкг на 1 кг массы тела в сутки. В России в настоящее время отсутствуют официальные методики контроля содержания акриламида в пищевой продукции, ТР ТС он не нормируется и допустимый уровень его суточного потребления пока не установлен (Чернова & Петроченкова, 2023).

Стратегии снижения содержания акриламида в пищевых продуктах предполагают: 1) прерывание реакции его образования варьированием уровня pH и влажности, внесением антиоксидантов или добавок для интенсификации конкурирующих реакций сахаров и аминокислот (органических кислот, Na^+ или Ca^{2+} , белков и аминокислот отличных от аспарагина); 2) снижение исходного содержания редуцирующих сахаров и аспарагина промыванием, бланшированием и ферментацией, либо использованием сельскохозяйственных культур с их заведомо меньшим содержанием; 3) снижение температуры и времени приготовления (Adebo et al., 2017; Edna Hee et al., 2024; Stadler & Theurillat, 2017). Отдельными исследователями показана необходимость дальнейшего изучения влияния более высоких температур и меньшего времени запекания на содержание акриламида в готовых блюдах (Duedahl-Olesen et al., 2022). Общие рекомендуемые меры по снижению уровня воздействия акриламида представлены Европейской ассоциацией производителей пищевых продуктов (Food Drink Europe, FDE)¹, а для отдельных видов продукции в свободном доступе на сайтах специализированных профильных ассоциаций² (Stadler & Theurillat, 2017).

¹ FDE Acrylamide Toolbox. URL: https://toiduteave.ee/wp-content/uploads/2018/09/FDE-AcrylamideToolbox_2013.pdf (дата обращения 20.05.2024).

² GoodFries.eu // European Potato Processors' Association. URL: <https://goodfries.eu/en/> (дата обращения 20.05.2024).

Полициклические ароматические углеводороды

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) представляют собой сложные смеси включая нитро- и гидрокси- и гетероциклические производные, 16 из которых (нафталин, аценафтилен, аценафтен, флуорен, антрацен, фенантрен, фторантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бенз[б]фторантен, бенз[к]фторантен, бенз[а]пирен, инден[1,2,3-сd]пирен, бенз[g,h,i]перилен и дибенз[а,h]антрацен) отнесены Агентством по охране окружающей среды США к приоритетным загрязнителям (M. Huang & Penning, 2014). Канцерогенные ПАУ образуются в результате копчения и жарки мяса, в том числе на гриле, а также в процессе обжарки кофейного зерна (Darwish et al., 2019; Edna Hee et al., 2024; Nerín et al., 2016; Vidaček, 2013). Кроме того, они содержатся в выхлопных газах и табачном дыме, выбросах предприятий по газификации угля, производству алюминия и мусоросжигательных заводов (M. Huang & Penning, 2014). Основной представитель ПАУ — бенз[а]пирен, согласно оценке МАИР канцероген группы 1, используется в качестве индикатора воздействия ПАУ. Бенз[к]фторантен, бенз[б]фторантен, бенз[а]антрацен, нафталин и хризен — канцерогены группы 2В (возможный канцероген для человека) (Edna Hee et al., 2024). На процесс их образования и содержание в готовом продукте влияют способ приготовления, температура, расстояние до пламени при приготовлении на открытом огне, время, тип нарезки мяса, содержание жиров (животных и растительных) (Darwish et al., 2019; Edna Hee et al., 2024; M. Huang & Penning, 2014). Исследования показали, что свинина содержит наибольшее количество ПАУ, затем следуют говядина и баранина, рыба, куриное мясо (Edna Hee et al., 2024). Самые низкие содержания ПАУ обнаружены в молоке и овощах.

Высокие концентрации ПАУ характерны для пищи, приготовленной на гриле и углях, вследствие пиролиза органических веществ. Для приготовленного на гриле мяса обнаружено содержание бенз[а]пирена в 2,7 раз большее чем на сковороде-гриль (Darwish et al., 2019). В исследовательских работах отмечается нежелательность длительного хранения приготовленной на гриле пищи, так как в этом случае содержание ПАУ увеличивается (возможно в результате образования продуктов

окисления жиров) (Edna Hee et al., 2024). При этом ввиду общего загрязнения окружающей среды ПАУ они могут присутствовать и в сыром мясе, растениях, морепродуктах и рыбе (Darwish et al., 2019; M. Huang & Penning, 2014). В том числе вследствие использования загрязненных упаковочных материалов из переработанного пластика или мешках из джута (масло для размягчения ткани может также содержать ПАУ).

При умеренных условиях обжарки кофейных зёрен преимущественно обнаружены низкомолекулярные ПАУ, но при более высоких температурах образуются более токсичные представители данной группы загрязнителей (Edna Hee et al., 2024). Удаление кофеина способствует снижению количеств образующихся при обжарке ПАУ, хотя этот аспект пока остаётся малоизученным.

Согласно обзору (L. Singh et al., 2016) ПАУ обнаружены также в молочной продукции (больше всего в сыре — 1643,18 мкг/кг), переработанных фруктах, овощах, и зерновой продукции (до 335,7 и 880 мкг/кг), морепродуктах (максимальные содержания в морских крабах — до 2618,4 мкг/кг), растительных маслах и кондитерских изделиях (на уровне 230 мкг/кг), в некоторых лекарственных препаратах и травах (в Матэ до 9001 мкг/кг), кофе (в кофе Суматра тёмной обжарки — 3091,1 мкг/кг) и в минимальных количествах в детском питании, орехах, соли и сахаре (не более 7 мкг/кг).

В настоящее время существует необходимость разработки нормативных стандартов содержания ПАУ для различных продуктов или групп продуктов, в соответствии со способами их приготовления. На территории РФ и ЕАЭС из всех ПАУ в пищевой продукции ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» нормируется содержание бенз[а]пирена (мг/кг): в детском питании, продуктах для беременных и кормящих женщин он не допускается (<0,2 мкг/кг); не более 0,005 — в копчёной рыбной продукции; 0,001 — в молоке и молочной продукции, а также копченых мясных, мясосодержащих и птичьих продуктах¹.

Фильтрация дыма и более «мягкие» условия копчения могут снизить загрязнение продуктов ПАУ (Vidaček, 2013). Возможно также в качестве альтернативы использование жидких ароматизаторов («жидкий дым») (Edna Hee et al., 2024). Для приготовления на гриле ре-

¹ Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» (с изменениями на 22 апреля 2024 г.) URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320560?ysclid=m4v2y49z96446426971> (дата обращения 19.12.2024).

комендуется выбирать мясо и рыбу с меньшим содержанием жира и готовить при более низкой температуре в течение более длительного времени. Природные и синтетические антиоксиданты ингибируют образование ПАУ в процессе приготовления пищевых продуктов. Использование маринадов, содержащих природные антиоксиданты (активные компоненты розмарина, чая, бамбука), позволяет существенно сократить содержание ПАУ в продуктах при обжарке на соевом и пальмовом масле (L. Singh et al., 2023). Общими рекомендациями также является избегание прямого контакта продуктов с пламенем и повторного использования масла при приготовлении блюд во фритюре.

Микотоксины

Микотоксины представляют собой вторичные метаболиты микроскопических грибов в основном родов *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Claviceps* и *Alternaria* (Haque et al., 2020). Загрязнение готовой продукции микотоксинами возможно на стадии получения сырья при отсутствии надлежащего входного контроля. Однако в большинстве случаев их появление в продуктах питания обусловлено нарушением условий хранения и транспортировки.

Наиболее опасными и преобладающими по обнаружению в пищевой продукции и продовольственном сырье являются афлатоксины, а именно афлатоксин В1 (АВ1), охратоксин А (ОТА), зеараленон (ЗОН), цитринин, патулин, фумонизины (FB1) и трихотеценовые микотоксины ниваленол/дезоксиниваленол (ДОН), Т-2, НТ-2 (Gallardo-Ramos et al., 2024; Haque et al., 2020; Iqbal et al., 2014; Stadler, 2019).

Значительная проблема связана с загрязнением зерновых продуктов продуктами трансформации микотоксинов (Li et al., 2024). Они не могут быть обнаружены с помощью стандартных аналитических процедур, поэтому оценка их токсикологических и токсикокинетических параметров, а также оценка риска контаминации продукции остается сложной задачей.

Кроме того, для вяленых мясных продуктов кроме специально колонизируемых видов плесени родов *Penicillium* и *Aspergillus* идентифицированы нежелательные их представители *Penicillium nordicum*, *Penicillium verrucosum*, *Aspergillus westerdijkiae* и *Aspergillus ochraceus*, в результате чего может происходить загрязнение вяленого мяса ОТА и афлатоксинами (Perrone et al., 2019).

Патулин появляется на поверхности фруктов, овощей, костяноквых и других плодов (яблоки, груши, вишня, виноград, инжир и др.), а затем поражает плоды целиком (Haque et al., 2020; Mahato et al., 2021). Контаминация отмечена не только после сбора урожая, но и для перезрелых фруктов до сбора.

С точки зрения риска контаминации микотоксинами продукции животноводства с кормами наиболее важны при обеспечении безопасности продуктов питания грибы *Aspergillus Flavus*, *Aspergillus Parasiticus* и *Aspergillus Nomius* (Jooste et al., 2014). Они продуцируют афлатоксин В1 и родственные ему токсины. Афлатоксины, фумонизины, охратоксин А, трихотецены и зеараленон являются наиболее распространенными микотоксинами в кормах для животных (Tolosa et al., 2021). Особую озабоченность в связи с АВ1 вызывает его попадание в молоко и молочную продукцию в виде метаболита — афлатоксина М1, обладающего потенциально канцерогенными свойствами (Jooste et al., 2014; Mühlemann, 2014; Smith & Kim, 2017).

Анализ готовых к употреблению продуктов на основе злаковых, бобовых, овощей, рыбы и мяса показал контаминацию 35 % зерновых блюд, 32 % овощных, 15 % бобовых и 9 % рыбных и мясных (Carballo et al., 2018). Максимальное количество обнаружений установлено для ДОН в овощах, мясе, рыбе и злаках (в рыбе и овощах самые высокие содержания); НТ-2 — в бобовых. В образцах мяса обнаружены самые высокие уровни ОТА. Афлатоксин В1 обнаружен в ферментированных соевых продуктах в количествах, превышающих допустимый уровень 5 мкг/кг, установленный в Китае (J. Zhang et al., 2024).

Немногие микотоксины подвергаются разложению при термообработке, поэтому единственным способом снижения их содержания в готовой продукции является недопущение использования контаминированного сырья, а в случае продукции животноводства — кормов для животных (Jooste et al., 2014; Mahato et al., 2021). Крайне важна правильная сушка сырья и соблюдение норм температуры и влажности при хранении. Химические методы деконтаминации основаны на применении кислот, щелочей и консервантов; физические — на использовании УФ-облучения, метода «холодной плазмы» и озонирования (Thanushree et al., 2019). В работе (T. Li et al., 2024) предложены стратегии обеззараживания путем подщелачивания, гидролиза, термической или химической трансформации, а также ферментативной или химической деструкции.

Биологические подходы к удалению микотоксинов включают применение микроорганизмов (бактерий, грибов, дрожжей), специфических ферментов (оксидаза, пероксидаза, лакказы, редуктаза, эстераза, карбоксилэстераза, аминотрансфераза, лактоногидролаза), адсорбентов, неорганических: гидратированные алюмосиликаты натрия и кальция, цеолиты, бентониты, активированный уголь, каолин и органических: волокна люцерны, овса, экстрагированные фракции клеточных стенок дрожжей, а также растительных продуктов (специи, растительные экстракты, ароматические масла) (Haque et al., 2020). В настоящее время развиваются и внедряются нанобиотехнологии, использование моноклональных и рекомбинантных специфичных к грибам антител и генетические технологии (выращивание трансгенных, устойчивых к грибам культур).

Пилотное исследование выявило снижение уровня эниатина В и а-охратоксина и повышение уровня β-зеараленола в моче после кратковременной замены продуктов в рационе на органические (Gallardo-Ramos et al., 2024). Показано, что такой подход может снизить риски, связанные с контаминацией одновременно микотоксинами и пестицидами. Однако для достоверной оценки синергетических взаимодействий различных загрязнителей необходимы более продолжительные исследования их токсикокинетики.

Биогенные амины

Еще одной группой потенциальных контаминантов пищевой продукции при несоблюдении условий хранения и производстве ферментированных продуктов (кисломолочных, мясных, соевых, овощных, и т.д.) являются биогенные амины — низкомолекулярные продукты декарбоксилирования аминокислот, образующиеся в процессе микробиологической ферментации (Saha Turna et al., 2024).

Биогенные амины могут образовываться в процессе порчи рыбы и морепродуктов (Ding & Li, 2024). Повышение температуры при хранении способствует быстрому размножению бактерий, что приводит к ускорению выработки биогенных аминов. Они не разрушаются при термической обработке продуктов (Saha Turna et al., 2024). Кроме того, биогенные амины являются предшественниками канцерогенных N-нитрозосоединений (Fong et al., 2021).

Некоторые ферментированные пищевые продукты могут содержать биогенные амины гистамин, тирамин и/

или фенилэтиламин: *Lactobacillus* spp. в основном участвуют в выработке гистамина, тирамина и путресцина, а *Enterobacteriaceae* и *Enterococcus* spp. — способствуют выработке путресцина, кадаверина и тирамина (Saha Turna et al., 2024).

Сыры с очень длительным сроком созревания могут содержать высокие концентрации главным образом тирамина и гистамина (Mühlemann, 2014). Они образуются в процессе созревания при протеолизе в результате декарбоксилазной активности микроорганизмов нативной флоры молока, либо заквасок.

Гистамин также синтезируется в организме рыб, способными продуцировать фермент гистидиндекарбоксилазу (FAO/WHO, 2013). Этот фермент катализирует превращение свободного гистидина, содержащегося в больших концентрациях в мышечной ткани рыб, в гистамин. Чаще всего продуцируют гистамин бактерии *Morganella morganii*, *Morganella psychrotolerans*, *Photobacterium damsela*, *Photobacterium phosphoreum*, *Raoultella planticola* и *Hafnia alvei*, а в случае ферментированных морепродуктов — *Staphylococcus* spp. и *Tetragenococcus* spp. Наибольшие количества гистамина содержатся в некоторых видах морской рыбы. Он образуется из свободного гистидина (в тканях тунца, макрели, махи-махи, сардин, анчоусов обнаружены более высокие его концентрации) под действием бактериальной гистаминдекарбоксилазы при нарушении температурного режима (Vidaček, 2013). В рыбе может содержаться от 320 (сайра) до 4900 (желтоперый тунец) мг/кг гистамина (FAO/WHO, 2013). Отравления гистамином при потреблении рыбы семейства скумбриевых наиболее частые (Özogul & Named, 2018). Для здорового человека максимальный уровень потребления гистамина составляет 200 мг/кг (FAO/WHO, 2013).

Чтобы ограничить накопление биогенных аминов в процессе ферментации продуктов оптимизируют условия их производства (изготовления): качество сырья, температуру, благоприятную для роста закваски, контролируют рост микроорганизмов и вводят адекватные количества добавок (сахар, соль, антимикробные средства) (Saha Turna et al., 2024). Во избежание порчи продуктов достаточно соблюдения условий и сроков их хранения. Технологии консервирования под высоким давлением обладают высоким потенциалом предотвращения накопления биогенных аминов в пищевой продукции благодаря инактивации микроорганизмов, вырабатывающих декарбоксилазу и подавлению активности фермента (Ganjeh et al., 2024).

Нитрозамины

В мясе и мясной продукции в результате реакции между вторичными и третичными аминами и нитритами в кислой среде (и как правило при нагревании) могут образовываться канцерогенные и генотоксичные *N*-нитрозосоединения (Nerín et al., 2016; Vidaček, 2013; Y. Zhang et al., 2023). В основном это смесь *N*-нитрозаминов и *N*-нитрозамидов.

Образование нитрозаминов может быть также связано и с восстановлением вторичных биогенных аминов из разложившейся или испорченной рыбы (Hernandez-Ledesma & Herrero, 2013). Биогенные амины, как упоминалось выше, являются их прекурсорами.

Нитрозодиметиламин (НДМА) обнаружен в некоторых продуктах после сушки или обжарки на открытом огне (Nerín et al., 2016). Это наиболее распространенный в пищевых продуктах нитрозамин, реже обнаруживается нитрозопирролидин (превалирует в беконе). Содержание в беконе *N*-нитрозоанилина и *N*-нитрозоморфолина коррелирует и уровнем добавляемых в процессе приготовления нитритов, причём максимальные их количества обнаружены при обжаривании на сковороде (Deng et al., 2021). Максимально допустимое содержание нитрозаминов нормируется ТР ТС 021/2011 в рыбной продукции и морских млекопитающих (в т.ч. сушеной продукции), а также в консервах мясных, из мяса птицы с добавлением нитрита натрия и консервах из субпродуктов, на уровне 0,003 и 0,002 мг/кг соответственно.

Для предотвращения контаминации продуктов нитрозаминами, необходимо контролировать качество и безопасность сырья, воды и соли и ограничить использование нитритов в технологическом процессе (Deng et al., 2021; Vidaček, 2013). Установлено также, что добавление некоторых растительных экстрактов (например листьев бамбука) может предотвратить образование *N*-нитрозаминов, как и добавление пробиотиков (некоторые штаммы *Lactobacillus* spp. и *Pediococcus* spp.) существенно снизить содержание нитритов (Y. Zhang et al., 2023). Кроме того, на пару и при кипячении образуется меньшее количество нитрозаминов, чем в духовке и на гриле (Nerín et al., 2016). Нитратредуцирующая активность некоторые бактерий также может приводить к образованию *N*-нитрозосоединений, но процесс можно ингибировать добавлением витаминов С и Е (Y. Zhang et al., 2023).

Загрязнители из упаковки

Стадия упаковки может стать источником контаминации пищевых продуктов при их непосредственном контакте с упаковочными материалами. Пластик, бумага и консервные банки, могут привести к загрязнению готовой продукции мономерами и олигомерами, пластификаторами, катализаторами и растворителями, биоцидами, отбеливателями, красителями и восками, а также смолами, используемыми для покрытия банок (Alamri et al., 2021; Mühlemann, 2014). Миграция загрязнителей зависит от времени контакта, температуры, pH, состава продукта (содержания в нём протеинов, жиров, пищевых кислот и т.д.), концентрации и свойств загрязнителя (летучесть, растворимость, липофильность), метода обработки, влажности, доступа света (Alamri et al., 2021). Диффузия является основным механизмом миграции загрязнителей из упаковки в продукт и из продукта в упаковку. Для её оценки разработаны математические модели, которые совершенствуются по мере более глубокого понимания влияющих на процессы переноса факторов.

Перфторированные и полифторированные соединения

Миграция перфторированных и полифторированных соединений (ПФАС) из упаковочных материалов в пищевые продукты ускоряется при хранении под прямыми солнечными лучами вследствие деструкции упаковки под действием УФ (Thakali & MacRae, 2021). Однако необходимо отметить, что ПФАС относятся к распространённым загрязнителями окружающей среды (Park et al., 2022; Schilberg et al., 2021). Это связано с их широким использованием в различных отраслях промышленности и бытовых изделиях (Neo et al., 2022).

Основными ПФАС, обнаруживаемыми в воде и продуктах питания, являются перфторбутират, перфторпентановая, перфторгексановая и перфтороктановая (ПФОК) кислоты (Thakali & MacRae, 2021). Поэтому нельзя исключать возможную контаминацию готовой продукции с сырьём, а не только из упаковки. ПФОК классифицируется Международным агентством по исследованию рака (МАИР, англ. IARC, International Agency for Research on Cancer) как канцероген 2-й группы (группа 2A — канцероген для человека с высокой вероятностью) (Schilberg et al., 2021).

Известно, что перфторированные соединения с более короткой цепью накапливаются в листьях и плодах,

а с более длинной — в корнях (Thakali & MacRae, 2021). Однако экспериментальных данных немного. В настоящее время большинство исследований сосредоточено на идентификации перфторированных и полифторированных соединений в воде и водных организмах (Fujii et al., 2020), поэтому даже для предварительной оценки риска загрязнения пищевой продукции сведений пока недостаточно.

Бисфенол А

Бисфенол А (БФА) используют в качестве мономера при производстве пластиковой тары для пищевых продуктов (Ghahremani et al., 2024; Lambré et al., 2023). Кроме того, эпоксидной смолой на его основе покрывают дно консервных банок. На степень миграции БФА в консервированную продукцию влияет не только состав и толщина покрытия, но и температура обработки, время, температура и объём воздуха в банке при хранении, содержание в продукции жира и консервантов (CEF, 2015; Ni et al., 2022).

БФА относится к группе эндокринных разрушителей, и в 2023 году EFSA пересмотрело переносимую суточную дозу, снизив её в 20 000 раз (до 0,2 нг/кг веса в день) (CEF, 2015).

Пути загрязнения мясной, рыбной и молочной продукции БФА остаются до конца не выясненными: миграция из упаковки может быть не единственным путём контаминации. Согласно результатам исследований (Gorecki et al., 2017) среднее содержание БФА в мясе и рыбе в упаковке и на развес отличалось незначительно, а в готовой мясной продукции, птице и субпродуктах (печени) без упаковки было выше. В работе (Santonicola et al., 2018) показано, что в упакованном молоке содержание БФА ниже, чем в исходном сырье. Предполагаемые альтернативные пути загрязнения: разделочные доски, плёнка для заворачивания мяса и косметика с рук работников (Gorecki et al., 2017) и поступление в организм животных с кормом и водой (Santonicola et al., 2018).

В России в настоящее время отсутствуют официально утверждённые аттестованные методики определения содержания БФА в пищевой продукции. В связи с широкомасштабным производством и применением поликарбонатного пластика и эпоксидных смол на основе

БФА для оценки его фоновых концентраций и обеспечения безопасности продукции животноводства необходимо исследование его содержаний и нормирование не только в объектах окружающей среды, но и в организме животных.

Фталаты

В качестве пластификаторов при производстве упаковочных материалов зачастую используются фталаты (производные фталевой кислоты, чаще всего диоктилфталат, ди(2-этилгексил)фталат) (Alamri et al., 2021). В бутилированной воде обнаружен их широкий спектр: ди(2-этилгексил)фталат, бензилбутилфталат, ди(н-октил)фталат, дибутилфталат, диэтилфталат, диметилфталат, диизодецилфталат, диизононилфталат, диизобутилфталат, бензилбутилфталат и т.д. (Luo et al., 2018), в детском питании преобладают диэтилфталат и ди(2-этилгексил)фталат (Ulanova et al., 2021), в соковой продукции — ди(н-октил)фталат, динонилфталат и ди(2-этилгексил)фталат (Зайцева и соавт., 2018).

Возможным источником поступления эфиров фталевой кислоты в бутилированную воду, соковую продукцию и детское питание могут быть прокладки для крышек, которые изготавливают из ПВХ, ПВА, полистирола, поликарбоната, полиэфиров, пластифицированных эфирами о-фталевой кислоты (Sanchis et al., 2017). Использование в пищевой промышленности некоторых фталатов в связи с их потенциальной опасностью для здоровья человека и животных ограничено в ЕС, США и Китае, в список приоритетных загрязнителей включены диметилфталат, бензилбутилфталат, дибутилфталат, диэтилфталат, ди(н-октил)фталат и ди(2-этилгексил)фталат.

В России содержание фталатов нормируется в упаковке, воздухе, питьевых и поверхностных водах СанПиН 1.2.3685–21, для определения диметилфталата, диэтилфталата, дибутилфталата, бензилбутилфталата, ди(2-этилгексил)фталата в молоке разработан МУК 4.1.3160–14¹. Содержание фталатов в пищевой продукции, как и БФА, не нормируется, оценивается только степень миграции.

Микропластик и нанопластик

Объём ежегодного производства пластика в мире составляет порядка 400 млн тонн, согласно прогно-

¹ МУК 4.1.3160–14 «Измерение массовых концентраций фталатов (диметилфталата, диэтилфталата, дибутилфталата, бензилбутилфталата, ди(2-этилгексил)фталата) в молоке методом высокоэффективной жидкостной хроматографии».

зу к 2050 г. вероятно его утроение. После попадания в окружающую среду под действием внешних факторов (УФ-излучение, механическое воздействие, метаболические превращения) он фрагментируется с образованием микро- и нанопластика (размер частиц от 1 мкм до 5 мм и от 1 нм до 1 мкм соответственно) (Martín-Gómez et al., 2024; Sohail et al., 2023).

В пищевой продукции главным образом присутствуют частицы полипропилена и полиэтилена, используемых в качестве упаковочных материалов (Sohail et al., 2023). На уровень миграции микропластика влияют температура (микроволновое излучение приводит к более высокому его высвобождению); состав среды продукта и его кислотность (более высокие уровни миграции в кислой среде); время контакта; характеристики упаковочного материала (плотность упаковки полимера, толщина материала, добавки); и механическое воздействие («истирание» материала при контакте с продуктом) (Shruti & Kutralam-Muniasamy, 2024). Поверхность грудки может быть загрязнена микропластиком из упаковки (Vitali et al., 2023). Однако, контаминация пищевой продукции может происходить, как и в случае с БФА, не только при непосредственном контакте с пластиком, но и на всём протяжении производственной цепи, в том числе через сырьё (почва * растения, корма * животные) и воду (Martín-Gómez et al., 2024; Sohail et al., 2023; Vitali et al., 2023). Опубликованы данные о способности частиц пластика размером менее 1,5 мкм проникать через кишечный барьер, а также мигрировать в толщу тканей (CONTAM, 2016a).

До недавнего времени частицы микропластика обнаруживали только в рыбе, двухстворчатых моллюсках, крабах, креветках, морских ежах, водорослях и других водных организмах (Vitali et al., 2023). Однако в последние годы перечень исследованных видов пищевой продукции существенно расширился, и они были обнаружены в овощах, фруктах (яблоках, грушах, брокколи, моркови, салате) и продукции животного происхождения (в мёде, мясе птицы и субпродуктах).

На частицах пластика могут быть сорбированы вредные для здоровья химические соединения такие как полибромированные дифениловые эфиры, БФА, фталаты, а также другие контаминанты из окружающей среды (Zurier & Goddard, 2021). Их токсичность хорошо изучена, в отличие от собственной токсичности микро- и нанопластика (CONTAM, 2016a).

Большинство исследований объектов окружающей среды и продуктов питания в настоящее время посвя-

щены идентификации и определению микропластика (Cunningham et al., 2023). Потенциальные токсические эффекты включают окислительный стресс, нарушение обмена веществ, иммунный ответ, нейротоксичность, а также репродуктивную токсичность и токсичность для развития (Martín-Gómez et al., 2024). Однако ввиду недостаточности экспериментальных данных о собственной токсичности микро- и нанопластика (CONTAM, 2016a) модели оценки риска в их отношении в настоящее время не предложены.

Предварительные исследования воздействия нанопластика на живые организмы на примере цыплят показали, что он может нарушать всасывание железа, а ряд исследований на культурах клеток человека выявил нарушение экспрессии генов (CONTAM, 2016a; Cunningham et al., 2023; Zurier & Goddard, 2021). Лабораторные исследования токсичности ограничиваются как правило частицами одного вида пластика — полистирола (Cunningham et al., 2023). Данных для проведения оценки риска пока недостаточно (CONTAM, 2016a; Cunningham et al., 2023). Объективные сведения о содержании микро- и нанопластика отсутствуют, поэтому пока невозможно разработать меры его контроля в пищевой продукции.

Для снижения содержания микро- и нанопластика в продуктах питания необходима минимизация их контакта с пластиковыми поверхностями как на этапе производства (изготовления), так и при дальнейшем хранении. В случае загрязнения окружающей среды в настоящее время предложен не только постепенный переход к использованию биоразлагаемых пластмасс, но и технологии биоразложения с использованием ферментов микроорганизмов, разрушающих пластик (Zurier & Goddard, 2021). Влияние микропластика на здоровье человека и животных малоизучено, и пока его можно рассматривать только в качестве потенциального загрязнителя.

Элементы и элементарноорганические соединения

Элементы и элементарноорганические соединения в рамках данной работы рассматриваются в отдельном разделе, так как данный вид загрязнения возможен на всех этапах производства готовой продукции.

Основные токсичные элементы: кадмий, свинец, ртуть и мышьяк. Антропогенное загрязнение играет ключе-

вую роль в загрязнении ими продуктов питания, хотя для некоторых регионов естественный путь контаминации кадмием и ртутью также возможен (Perugini et al., 2016; Wang et al., 2023). Пищевыми источниками кадмия являются зерновые (рис, озимая пшеница, овёс, ячмень) и овощные продукты (шпинат и салат-латук), растительное масло, грибы, а также некоторые виды рыбы и продукция аквакультуры (моллюски, устрицы, мидии) (Smith & Kim, 2017; Vidaček, 2013). Злаки и овощи являются и основным путём поступления свинца в рацион (Smith & Kim, 2017). Наиболее распространённая форма органической ртути в рыбе и морепродуктах — метилртуть (Vidaček, 2013). В других продуктах ртуть присутствует преимущественно в неорганической форме, в том числе в некоторых видах грибов (Drewnowska et al., 2012).

Проблема загрязнения пищевой продукции мышьяком связана с использованием загрязненной воды для орошения сельскохозяйственных культур (в основном риса) и загрязнения продукции животноводства в случае присутствия в рационе домашнего скота кормов и пищевых добавок, содержащих мышьяк (Upadhyay et al., 2019). Высокие уровни накопления мышьяка, сопоставимые с рисом в пересчете на сухой вес, обнаружены в картофеле. В растительной продукции (зерновых и овощах) в основном присутствует неорганический мышьяк, в грибах — органический и неорганический (Liu et al., 2023), в морепродуктах — доминируют органические его формы (арсеносахара, арсенобетаины, арсеноллипиды и т.д.) (Upadhyay et al., 2019).

В исследовании (Ling et al., 2014) обнаружено, что в сырой рыбе содержится меньшее количество As, чем в жареной. Обжаривание приводит к максимальному увеличению содержания As за счёт снижения содержания воды, далее следуют приготовление на гриле и запекание. Токсичность различных форм мышьяка отличается, что связано с их растворимостью и биодоступностью (J. Li et al., 2021; Upadhyay et al., 2019). Неорганические соединения As(III) и As(V) считаются более токсичными. В процессе приготовления при высокой температуре отмечена способность арсенобетаина и арсенохолина превращаться в триметиларсин, триметиларсина оксид и диметиларсинат (Cheyins et al., 2017). Согласно ТР ТС 021/2011 допустимые уровни токсичных элементов в рыбе, нерыбных объектах промысла и продуктах, вырабатываемых из них, предполагают пересчет на исходный продукт с учетом содержания сухих веществ в нём и конечном продукте.

Тяжелые металлы (Приложение 4) не подвергаются биологической деградации, способны аккумулироваться в живых организмах, в результате попадая в продукцию, употребляемую человеком. Кроме того, они не испаряются и не разлагаются на безвредные компоненты в процессе обработки сырья, а чаще всего мигрируют в обрабатывающую среду, либо сохраняются в готовой продукции в неизменном виде.

Оптимизация количества воды, температуры и продолжительности приготовления необходима для снижения риска накопления элементарноорганических соединений, в том числе токсичных форм мышьяка при приготовлении рыбы (Ling et al., 2014). Варка как показано на примере американского сига (*Coregonus clupeaformis*) снижает содержание мышьяка в рыбе, но приводит к увеличению содержания селена (Amyot et al., 2023). Уменьшение в процессе приготовления общего содержания мышьяка на примере китайского мохнаторукого краба (*Eriocheir sinensis*) подтверждено и в работе (Cao et al., 2022). Использование большого количества воды приводит к значительному снижению его суммарного содержания в процессе мойки зерновых и овощей, замачивания и приготовления (Liu et al., 2023). Многообещающий подход к снижению токсичности As — ферментация, так как она позволяет перевести неорганический As в его менее токсичные метилированные формы. Для снижения содержания Cd в рисе наиболее простым и доступным остаётся физический метод, включающий в себя предварительное замачивание в воде и приготовление (также в воде) (Wang et al., 2023). Доказано, что кипячение не влияет на содержание ртути в тканях хека, а для лобстера процесс варки приводит к увеличению её концентрации (Perugini et al., 2016). Ртуть прочно связана с белками пищевой матрицы и может концентрироваться в результате этого процесса, так как при нагревании белки и коллаген денатурируются и сокращаются в объемах, что приводит к потере мышечными тканями воды (Amyot et al., 2023). Хотя умеренное потребление рыбы неопасно для человека, при употреблении большого количества (более трёх раз в неделю) загрязнённой метилртутью рыбы или продуктов мяса морских млекопитающих риск отравления существенно возрастает (Vidaček, 2013).

Из упаковочных материалов как правило мигрируют олово, свинец, железо, марганец, серебро, цинк, хром, никель, алюминий, медь, сурьма и селен (Pasias et al., 2018). Для консервированных продуктов в жестяной

О.И. Лаврухина, Д.А. Макаров, Е.С. Козеичева, Т.В. Балагула, А.В. Третьяков, М.А. Гергель, Е.А. Лозовая

упаковке важную роль в скорости миграции олова, свинца, железа и марганца играет время хранения. Как показано в работе (Buculei et al., 2014), самая высокая степень миграции металлов в продукцию наблюдается при температуре от 4 до 50 °С. Свинец, кобальт, никель и цинк могут попадать в продукты питания из керамических материалов и важную роль в скорости и степени их миграции и накоплении играет кислотность консервированных пищевых продуктов (Pacias et al., 2018).

Развитие нанотехнологий привело к созданию упаковочных материалов на их основе. Наиболее широкое применение при производстве упаковочных материалов для пищевой продукции в настоящее время нашли наночастицы Ag, Au, Fe, Ir, Cu, Pd, CuO, SiO₂, Al₂O₃, ZnO, Fe₂O₃ и Fe₃O₄, TiO₂ и TiN, а также монтмориллонит (наноглина, основной компонент бентонита) и хитозан (Bumbudsanpharoke & Ko, 2015; Mihindukulasuriya & Lim, 2014). Токсичность, антиоксидантные и антимикробные свойства нанокомпозитных упаковочных материалов зависят от размера наночастиц, входящих в их состав

(J. Y. Huang et al., 2015). Это может быть связано с площадью активной поверхности, контактирующей с кислородом, и способностью частиц проникать через клеточную мембрану.

Миграция неорганических наночастиц, как и других компонентов упаковочных материалов, контактирующих с пищевой продукцией, зависит от pH среды, времени контакта, температуры и влажности. Основным же определяющим фактор — технология производства упаковки: заливка раствором, электропрядение, выпаривание растворителя, двухшнековая экструзия, напыление спрея, погружение/реакция, реактивное магнетронное распыление (Mihindukulasuriya & Lim, 2014).

Сведения о группах загрязнителей, стадиях возможной контаминации и мерах снижения уровня загрязнения после извлечения данных на базе Приложения 1 обобщены в Таблице 3. Схема возможной контаминации готовой продукции представлена на Рисунке 3.

Таблица 3

Потенциальные загрязнители готовой продукции

Table 3

Potential Contaminants of Finished Products

Группа загрязнителей	Стадия производства/ Технологический процесс	Меры снижения уровня загрязнения
Антибактериальные препараты	Сырьё животного и растительного происхождения, загрязнённая вода	(1) «Нулевая толерантность» ¹ для потенциально опасных препаратов и продуктов их трансформации (Киш и соавт., 2022; Лаврухина и соавт., 2017, Ramos et al., 2017; Tian & Bayen, 2018); (2) Разработка максимально чувствительных методик определения остаточных содержаний антибиотиков в продовольственном сырье и готовой продукции (Amelin & Lavrukina, 2017).
Пестициды	-/-	(1) «Нулевая толерантность» для токсичных пестицидов и потенциально опасных продуктов их трансформации ¹ ; (2) Снижение пределов обнаружения методик определения содержания (Jia et al., 2024); (3) В зависимости от физико-химических свойств пестицида: промывка проточной водой; ферментация; гидролиз и окисление; фотодеградация (Djordjevic & Djurovic-Pejcev, 2016).
Аллергены	Сырьё растительного и животного происхождения	(1) Маркировка продукции без аллергенов (Planque et al., 2016); (2) Максимально чувствительные и специфичные методы определения содержания (отсутствие даже следовых количеств аллергенов) (Planque et al., 2016); (3) В зависимости от свойств веществ: термическая обработка, ферментация, ферментативный катализ, экструзия при высоком содержании влаги, гликозилирование, действие высокого гидростатического давления, ультразвук, импульсного ультрафиолетового излучения, холодной плазмы, взаимодействие с полифенолами (Cuadrado et al., 2023; Dong & Raghavan, 2022; Z. Huang et al., 2023).
Биотоксины	-/-	Контроль сырья: разработка чувствительных и селективных методик (Abraham & Rambla-Alegre, 2017; Vidaček, 2013).

¹ Joint FAO/WHO food standards programme codex committee on pesticide residues. 52nd Session (July-August 2021). URL: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/fr/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-718-52%252FCRDs%252Fpr52_CRD12x.pdf.

Группа загрязнителей	Стадия производства/ Технологический процесс	Меры снижения уровня загрязнения
Пищевые добавки	Технологии приготовления продуктов питания, предполагающие применение пищевых добавок; хранение	(1) Контроль содержания добавок в готовой продукции (Kumar et al., 2019); (2) Использование в качестве добавок безопасных природных биологически активных компонентов (El-Saber Batiha et al., 2021).
МХПД и глицидол	Высокотемпературная обработка продукции, содержащей растительные масла	(1) Нормирование и контроль содержания (Commission Recommendation 2014/661/EU); (2) Выбор подходящего сырья для производства масел (CONTAM, 2016b); (1) Снижение предшественников загрязнителей перед обработкой (Pudel et al., 2011); (2) Изменение условий и внедрение дополнительных этапов рафинирования масел (CONTAM, 2016b); (3) Снижение количества соответствующих эфиров в масле с помощью адсорбентов (CONTAM, 2016b).
Акриламид	Высокотемпературная обработка продукции, содержащей большие количества углеводов	(1) Нормирование и контроль содержания (Fan et al., 2023); (2) Прерывание реакции образования (рН и влажность, внесение добавок; снижение исходного содержания редуцирующих сахаров и аспарагина (промыывание, бланширование и ферментация, использование сырья с меньшим их содержанием (Adebo et al., 2017; Edna Hee et al., 2024; Stadler & Theurillat, 2017); (3) Оптимизация температуры и времени приготовления (Duedahl-Olesen et al., 2022b).
ПАУ	Копчение, приготовление на гриле и углях, продовольственное сырьё, упаковка	(1) Нормирование и контроль содержания ТР ТС 021/2011; (2) Фильтрация дыма (более «мягкие» условия копчения) (Vidaček, 2013); (3) Природные и синтетические антиоксиданты для ингибирования образования ПАУ; избегание прямого контакта продуктов с пламенем; отказ от повторного использования масла для фритюра (Singh et al., 2023).
Микотоксины	Хранение	(1) Контроль растительного сырья и кормов для животных (Jooste et al., 2014; Mahato et al., 2021); (2) Соблюдение норм температуры и влажности при хранении (Haque et al., 2020; Tolosa et al., 2021); (3) Химические и физические методы деконтаминации (гидролиз, консерванты, ферментация; УФ, «холодная плазма» и озонирование) (Thanushree et al., 2019); (4) Применение микроорганизмов и специфических ферментов, использование органических и неорганических адсорбентов (Haque et al., 2020; T. Li et al., 2024); (5) Внедрение современных биотехнологических подходов (Haque et al., 2020).
Биогенные амины	Сырьё животного происхождения, ферментация	(1) Контроль сырья и соблюдение условий и сроков хранения сырья и готовой продукции (Saha Turna et al., 2024); (2) Оптимизация условий производства ферментированных продуктов (Saha Turna et al., 2024); (3) Консервирование под высоким давлением (Ganjeh et al., 2024).
Нитрозамины	Взаимодействие между вторичными и третичными аминами и нитритами в кислой среде (как правило при нагревании); восстановление вторичных биогенных аминов	(1) Контроль качества и безопасности сырья, воды и соли, ограничение использования нитритов (Deng et al., 2021; Hernandez-Ledesma & Herrero, 2013; Vidaček, 2013); (2) Добавление в качестве консервантов безопасных природных соединений, добавление витаминов С и Е для ингибирования нитратредуцирующих бактерий (Y. Zhang et al., 2023).
Пер- и полифторированные соединения	Упаковка, продовольственное сырьё	Контроль сырья и готовой продукции: разработка чувствительных и селективных методик определения содержания (необходимы экспериментальные данные) (Thakali & MacRae, 2021; Theurillat et al., 2023)
БФА	Упаковка, контакт с контаминированными разделочными поверхностями, продовольственное сырьё	Нормирование и контроль содержания (CEF, 2015).
Фталаты	Упаковка	Ограничение использования потенциально опасных фталатов (Sanchis et al., 2017).
Микро- и нанопластик	Упаковка, продовольственное сырьё	(1) Разработка методик определения содержания в пищевой продукции (Hassoun et al., 2023; Martín-Gómez et al., 2024); (2) Оценка фоновых содержаний в объектах окружающей среды и продовольственном сырьё (CONTAM, 2016a; Cunningham et al., 2023).
Элементы и элементарно-химические соединения	Загрязнение возможно на всех этапах	Контроль сырья и готовой продукции (Лаврухина и соавт., 2017).

Примечание. «Нулевая толерантность» — в пищевой продукции не допускаются остаточные содержания веществ на уровне предела обнаружения методики.

Note. “Zero tolerance” — residual levels of substances are not permitted in food products, even at the method’s limit of detection.

Рисунок 3

Схема возможной контаминации готовой продукции

Figure 3

Schematic of Possible Contamination of Finished Products



Перечень химических загрязнителей, а также допустимые уровни (ДУ) для одних и тех же веществ, могут значительно различаться в разных странах. Это связано с различными подходами, результатами научных исследований, концепциями пищевой безопасности, решениями должностных лиц, отвечающих за управление рисками, а также экономическими факторами. Эти различия могут создавать барьеры в международной торговле. Поэтому важно учитывать эти аспекты как производителям-экспортерам, так и контролирующим органам и лабораториям.

Современные тенденции в определении химических загрязнителей в пищевой продукции

В отношении соединений, для которых предусмотрена «нулевая толерантность» (МДУ — не допускается), необходима разработка максимально чувствительных методов лабораторного контроля. Это позволяет выводить из обращения сырьё, содержащее следовые количества (на уровне предела обнаружения методики) запрещённых и потенциально опасных веществ во избежание их аддитивного накопления в готовой продукции смешанного состава.

В анализе продовольственного сырья и готовой продукции в настоящее время наиболее актуальными направле-

ниями являются, во-первых, разработка методик определения содержания загрязнителей вне лабораторных условий, во-вторых, одновременный многокомпонентный анализ, в-третьих, изучение процессов и определение продуктов трансформации, и в-четвертых, разработка методик контроля потенциальных загрязнителей, обусловленных появлением новых материалов.

Биосенсоры благодаря своей простоте, доступности и возможности анализа «на месте» (*on-site*) нашли широкое применение в контроле качества и безопасности пищевой продукции (Kobun, 2021). Они позволяют отличать натуральные продукты от синтетических и выявлять их фальсификацию, оценивать сроки годности и параметры безопасности (микробиологические и химические), а также контролировать технологические процессы при ферментировании. Электрохимические иммуносенсоры предложены для определения в пищевой продукции аллергена моллюсков тропомиозина (Torre et al., 2022), устойчивого к термической обработке и ферментативному протеолизу аллергена сои Gly m TI (Dias et al., 2024), биогенных аминов в рыбе и морепродуктах (Dias et al., 2024), акриламида в продуктах, подвергающихся высокотемпературной обработке (Edna Hee et al., 2024). Люминесцентные иммуносенсоры используются для определения антибиотиков в молоке (Brown et al., 2022; Zhang et al., 2024).

Для определения биогенных аминов предложены также различные флуоресцентные и колориметрические сенсоры, в том числе способ установления порчи морепродуктов методом цифровой цветометрии индикаторных тест-систем (Амелин, Шаока, Большаков, Третьяков, и соавт., 2023). Цифровая цветометрия, цветометрия собственной флуоресценции образцов и диффузного отражения ИК-излучения с использованием смартфона и хеометрического анализа позволяют решать задачи выявления фальсификации продуктов питания (Амелин, Емельянов, и соавт., 2024; Амелин, Шаока, и соавт., 2024), а кроме того, идентифицировать и аутентифицировать их происхождение (Амелин, Шаока, & Большаков, 2023; Амелин, Шаока, Большаков, & Третьяков, 2023). Цифровая колориметрия предложена также для определения фторидов в воде и молоке (Kovalchuk et al., 2024).

Миниатюризованная молекулярная спектроскопия в ближней и средней областях ИК-спектра в сочетании с хеометрическим анализом позволяет также проводить фенотипирование, контроль качества и аутентификацию пищевой продукции, и идентификацию в продуктах питания загрязняющих веществ (Rodriguez-Saona et al., 2020). Развитие нанотехнологий позволило разработать на их основе нано- и нанобиосенсоры для контроля биологической и химической контаминации продовольственного сырья и пищевой продукции (Kuswandi et al., 2017). Однако, несмотря на все преимущества сенсоры и тест-системы позволяют предварительно оценить содержание загрязнителей и в случае их обнаружения потребуются подтверждающий арбитражный анализ.

В количественном анализе продовольственного сырья и пищевой продукции по показателям качества и безопасности предложены стандартизованные селективные, чувствительные и точные методики. Определение токсичных элементов, тяжелых металлов, микро- и макроэлементов проводят методами атомной спектроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП–МС) (Морев & Виноградова, 2019; Grachev et al., 2023). Решение более сложных аналитических задач возможно с использованием гибридных методов. Так, для дифференцированного определения элементов и их элементарно-органических форм применяют ВЭЖХ–ИСП–МС¹.

Разнообразие потенциальных загрязнителей продовольственного сырья и готовой продукции и сложность матриц требует разработки универсальных, чувствительных и селективных методик одновременного определения большого спектра соединений. Разделение компонентов методами газовой и высокоэффективной хроматографии в сочетании с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ–МС, ВЭЖХ–МС/МС) наиболее широко применяется для определения лекарственных препаратов, пестицидов, микотоксинов, диоксинов, ПХБ, биогенных аминов и нитрозаминов, пластификаторов, пер- и полифторированных соединений, МХПД, ПАУ, акриламида, фитоэстрогенов. Примеры применения разработанных методик представлены в Таблице 4.

В продуктах питания могут содержаться связанные формы токсикантов. Так, замаскированные микотоксины (конъюгированные, например с глюкозой) не могут быть обнаружены обычными методами (Stadler, 2019). В мутном яблочном соке (с мякотью) может содержаться патулин, до 20 % которого не обнаруживается ВЭЖХ–УФ (Mahato et al., 2021). Ковалентную связь патулина с белками и небольшими пептидами трудно разорвать в процессе пробоподготовки. При этом в процессе гидролиза в ЖКТ токсичные соединения могут высвобождаться, что представляет угрозу здоровью потребителей.

Для одновременного определения диоксинов, ПХБ и пестицидов эффективно использование двумерной газовой хроматографии в сочетании с времяпролетной масс-спектрометрией (ГХ²ГХ–МС–ВП) (Planche et al., 2017). Метод востребован благодаря более высокому, чем в случае одномерной ГХ разрешению, чувствительности и возможности высокопроизводительного анализа сложных образцов с высоким содержанием жира.

Биологическое разнообразие морских обитателей обуславливает большое количество возможных разных по структуре и свойствам токсинов (Vidaček, 2013). Поэтому для определения биотоксинов в рыбе, рыбной продукции и морепродуктах также необходим многокомпонентный анализ. Использование масс-спектрометрического детектирования позволяет обнаруживать новые, ранее не идентифицированные морские токсины (Leal & Cristiano, 2022).

¹ ГОСТ 34462–2018. Определение содержания неорганического мышьяка методом высокоэффективной жидкостной хроматографии — масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Стандартиформ.

О.И. Лаврухина, Д.А. Макаров, Е.С. Козеичева, Т.В. Балагула, А.В. Третьяков, М.А. Гергель, Е.А. Лозовая

Таблица 4

Высокоэффективная жидкостная и газовая хроматография с масс-спектрометрическим детектированием в анализе продовольственного сырья и пищевой продукции

Table 4

High-Performance Liquid and Gas Chromatography with Mass-Spectrometric Detection in the Analysis of Food Raw Materials and Food Products

Аналит	Объект анализа	Метод определения	Предел обнаружения / определения	Литература
756 загрязнителей: пестициды, СОЗ, ветеринарные препараты, морские токсины	Продукция аквакультуры	ВЭЖХ–МС-ВП	— / ≤10,0 мкг/кг	(Bai et al., 2022)
492 загрязнителя: пестициды и их метаболиты, ветеринарные препараты, микотоксины, красители	Молоко, мясо, рыба, жир, яйца, субпродукты, овощи и фрукты, зерно и корма	ВЭЖХ–МС-ВР	0,0005–100 нг/мл / 0,003–250 нг/мл	(Amelin et al., 2016)
337 загрязнителей: пестициды, микотоксины и ветеринарные препараты	Детские молочные смеси	УВЭЖХ–МС-ВР	- / 0,049–0,39 нг/мл	(Izzo et al., 2022)
46 пестицидов	Растительные масла	ГХ–МС/МС	— / 1 нг/г	(Zhao et al., 2019)
25 пестицидов	Молоко и молочная продукция	ГХ–МС	— / <МДУ	(Manav et al., 2019)
8 биогенных аминов	Сушеное мясо яка	ВЭЖХ–МС/МС	0,40–2,50 мкг/кг / 1,25–7,50 мкг/кг	(Xia et al., 2024)
13 фталатов	Соковая продукция	ВЭЖХ–МС/МС	— / 0,0003–0,012 мг/дм³	(Зайцева и соавт., 2018)
9 фталатов	Детское питание	ВЭЖХ–МС/МС	~0,003 мг/кг/ -	(Ulanova et al., 2021)
27 пластификаторов, включая фталаты	Кофе (в т.ч. капсулированный)	ГХ–МС-ВР	0,004–3,2 мг/л / 0,012–9,1 мг/л	(Di Bella et al., 2014)
27 пластификаторов	Чай (в т.ч. в пакетиках)	ГХ–МС-ВР	0,005–3,752 мг/л / 0,015–12,502 мг/л	(Lo Turco et al., 2015)
Фуран, хлороформ, бензол, трихлорэтен, толуол и стирол	Детское питание, арахисовое масло, консервированный тунец, напитки	ГХ–МС	0,02–1,68 нг/г / 0,05–5,1 нг/г	(Nyman et al., 2014)
Глицидиловые эфиры и МХПД	Маргарин	ВЭЖХ–МС/МС	3 и 30 нг/г / 10 и 100 нг/г	(Custodio-Mendoza et al., 2023)
Акриламид	Чипсы и жареный картофель	ГХ–МС	4 мкг/кг / 10 мкг/кг	(Molina-Garcia et al., 2015)
ПАУ: бензо[а]антрацен, хризен, бензо[б]флуорантен и бензо[а]пирен	Мясо, приготовленное на гриле	ГХ–МС	0,008–0,21 мкг/кг / 0,24–0,63 мкг/кг	(Lee et al., 2016)
N-нитрозоанилин и N-нитрозоморфолин	Обжаренный бекон	ГХ–МС/МС	—	(Deng et al., 2021)
189 ПХБ, 17 ПХДД и ПХДФ, 16 пестицидов	Мясо	ГХxГХ–МС-ВП	—	(Planche et al., 2017)
Пер- и полифторированные соединения	Морепродукты	УВЭЖХ–МС/МС	≤0,0017 нг/г / 0,001–0,005 нг/г	(Sun et al., 2021)
57 пер- и полифторированных соединений	Сухое молоко, молочные смеси для детского питания, пюре для детского питания на мясной основе, рыба и рыбий жир, свежие яйца и растворимый кофе	ВЭЖХ–МС/МС	— / 0,01 мкг/кг	(Theurillat et al., 2023)
67 фитоэстрогенов	Растительная продукция	ВЭЖХ–МС/МС	— / 5,5–331,8 нг/мл	(Myrtsi et al., 2023)

Примечание. Таблица составлена авторами обзора, основываясь на информации из проанализированных источников.

Note. The table was compiled by the authors of the review based on information from the analyzed sources.

Аллергены являются сложными аналитами не только при использовании методов ПЦР и ИФА (недостаточная специфичность зачастую приводит к ложноположительным или ложноотрицательным результатам), но и в количественном химическом анализе методом ВЭЖХ–МС/МС (Planque et al., 2016). Его специфичность и чувствительность даёт возможность проводить одновременный многокомпонентный анализ не только сырой продукции, но и в обработанной. Однако для количественного определения «скрытых» пищевых аллергенов в прошедшей обработке продукции необходимы внутренние стандарты. Масс-спектрометрия высокого разрешения (МС-ВР) отличается большей точностью и позволяет в сочетании с ВЭЖХ не только идентифицировать маркерные пептиды, но и определять их содержание, как показано на примере основных аллергенных белков коровьего молока α -s1-казеина и b -лактоглобулина в мясных продуктах (Bianco et al., 2022), маркерных пептидов аллергенов молока, яиц, ракообразных и сои в мясной и рыбной продукции (Stella et al., 2020), а также молока, яиц, арахиса, сои, фундука и миндаля в порошковом бульоне и шоколаде (Pilolli et al., 2021).

Капиллярный электрофорез является конкурентоспособной альтернативой традиционно используемым подходам оценки безопасности и качества пищевой продукции при определении биогенных аминов, микотоксинов, ароматический и гетероциклических аминов, антибиотиков, пестицидов, ПАУ, фталатов, пищевых добавок (в том числе синтетических красителей), неорганических и органических ионов (Большаков & Амелин, 2023).

Сложность процессов трансформации и дополнительный риск контаминации готовой продукции подразумевает внедрения нестандартных подходов в химическом анализе. Образование ПАУ может быть связано с реакцией, опосредованной свободными радикалами, а ненасыщенные углеводороды могут быть предшественниками ПАУ при обжаривании. Для обнаружения промежуточных продуктов и более подробного изучения механизмов образования ПАУ эффективна технология отслеживания изотопов и их онлайн-идентификации (Xu et al., 2023).

ISO 18363–4:2021 предложена ГХ–МС/МС-методика одновременного определения эфиров 2-МХПД (свя-

занный 2-МХПД), сложных эфиров 3-МХПД (связанный 3-МХПД) и глицидиловых эфиров (связанный глицидол), основанная на расщеплении эфира при щелочном гидролизе и дериватизации расщепленных (свободных) аналитов фенилбороновой кислотой¹. Однако она позволяет определять содержания аналитов только в твердых и жидких жирах и маслах и не распространяются на молокосодержащую и белково-жировую продукцию, спреды, маргарины и соусы.

Как показывает анализ литературных данных, в продовольственном сырье могут содержаться метаболиты и продукты абиотической трансформации лекарственных препаратов, микотоксинов и пестицидов, не менее опасные, чем исходные соединения (Киш и соавт., 2022). Нецелевой анализ, основанный на применении хроматографического разделения в сочетании с МС-ВР, является наиболее перспективным инструментом для определения не выявленных в рамках целевого исследования загрязнителей.

Новые материалы также представляют дополнительную угрозу контаминации готовой продукции. Для определения наночастиц необходимо одновременное использование нескольких методов, так как каждый из них в отдельности оказывается неинформативным. Анализ должен включать в себя обработку изображений (растровая, просвечивающая электронная и атомно-силовая микроскопия); характеристику частиц (МС, рентгеновская дифракция, ядерный магнитный резонанс) и их разделение (ВЭЖХ, гидродинамическая хроматография, FFF (*англ.* Field-Flow Fractionation — фракционирование в потоке при наличии поля) (Artiaga et al., 2015). При определении наночастиц в пищевой продукции хорошо зарекомендовали себя МС-ИСП и ОЭС-ИСП в сочетании с эксклюзионной, гель-проникающей хроматографией, гель-электрофорезом и дифференциальным анализатором подвижности частиц в электрическом поле (G. Singh et al., 2014).

Миграцию титана и цинка в пищевую продукцию из наночастиц их оксидов (TiO₂- и ZnO-содержащие композитные упаковочные материалы) характеризуют методами МС-ИСП и ОЭС-ИСП в сочетании с электронной микроскопией и AF4 (Lin et al., 2014; Peters, van Bommel, et al., 2014; Song et al., 2014). Определение наносеребра возможно методом AF4–МС-ИСП и SP–МС-ИСП, допол-

¹ ISO 18363–4:2021. Animal and vegetable fats and oils — Determination of fatty-acid-bound chloropropanediols (MCPDs) and glycidol by GC/MS. Part 4: Method using fast alkaline transesterification and measurement for 2-MCPD, 3-MCPD and glycidol by GC-MS/MS.

нительное подтверждение морфологии частиц осуществляют растровой электронной и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (Artiaga et al., 2015; Peters, Rivera, et al., 2014).

Анализ частиц микро- и нанопластика состоит трёх этапов — выделения, детектирования с подсчётом количества частиц и идентификации. Для выделения частиц пластика используют кислотный, щелочной и ферментативный гидролиз образца, фильтрацию и разделение на основе гидрофобных взаимодействий (CONTAM, 2016a; Gmshinski et al., 2023). Для детектирования микропластика и подсчёта частиц применяют оптическую, флуоресцентную электронную и атомно-силовую микроскопию. Для идентификации подходит рамановская спектроскопия и ИК-спектроскопия с преобразованием Фурье, также предложены гибридные методы с использованием масс-спектрометрии: пиролитическая газовая хроматография с МС-детектированием (CONTAM, 2016a; Gmshinski et al., 2023; Hassoun et al., 2023; Vitali et al., 2022). Референтного метода определения микро- и нанопластика в пищевой продукции в настоящее время не предложено (Hassoun et al., 2023; Martín-Gómez et al., 2024). Не определена и единая единица измерения его содержания (Gmshinski et al., 2023), а разработанные методики не содержат полного набора валидационных характеристик (Vitali et al., 2022).

Дальнейшее развитие аналитического контроля готовой продукции предполагает таким образом, во-первых, совершенствование сенсоров и переход от полуколичественной к количественной оценке содержания загрязнителей, что возможно с использованием хемометрических подходов обработки данных. Во-вторых, разработку методик одновременного многокомпонентного анализа максимально широкого спектра загрязнителей. В-третьих, внедрение методов онлайн-детектирования в рамках производственного контроля. И в-четвертых, разработку и стандартизацию методик определения загрязнителей, обусловленных применением в пищевой промышленности новых материалов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведённый обзор позволил системно зафиксировать основные направления исследований в области химической контаминации готовой пищевой продукции, выявить преобладающие группы загрязнителей, определить точки поступления химических агентов

на различных этапах производственно-логистической цепи и сопоставить научные данные с практиками лабораторного и нормативного контроля. При этом была предпринята попытка интеграции данных как академических источников, так и ведомственных информационных систем (Vetis, ANSES), что позволило расширить традиционные рамки литературы, обычно ограниченной только научными публикациями.

Полученные результаты показывают, что современные исследования сосредоточены преимущественно на трёх кластерах загрязнителей: остаточные количества ветеринарных препаратов (в первую очередь, тетрациклинов), мигрирующие из упаковочных материалов соединения (фталаты, первичные ароматические амины) и продукты термической трансформации (акриламид, полициклические ароматические углеводороды). Эта структура в целом подтверждает выводы предыдущих обзоров (Nerín et al., 2016; FAO, 2017; Guo et al., 2022), однако в ряде аспектов позволяет уточнить или скорректировать их позиции.

В отличие от систематических обзоров, фокусировавшихся исключительно на отдельных классах загрязнителей или конкретных пищевых матрицах (см., например, Abolhassani et al. (2020) — по фталатам в мясной продукции; Liu et al. (2021) — по ПАУ в выпечке), настоящая работа охватывает широкий спектр категорий готовых продуктов, включая сложные блюда, полуфабрикаты, изделия из теста, молочные десерты и пр. Это обеспечивает более репрезентативную картину химических рисков в современной структуре потребления. Кроме того, ряд предшествующих обзоров не учитывал вторичные загрязнители, формирующиеся в процессе хранения и повторной термической обработки, тогда как в рамках нашего анализа такие механизмы рассматриваются как важная и недооценённая компонента контаминационного профиля.

Сравнение с метаобзорами EFSA (2020–2022) и ANSES показывает, что регуляторные данные имеют более высокий охват, но ограниченную аналитическую глубину. В отличие от них, настоящий обзор сочетает количественные индикаторы с оценкой распределения тематических и методологических акцентов, что позволяет выявить как нормативные, так и исследовательские лакуны. Например, несмотря на наличие МДУ по большинству целевых соединений, отсутствуют унифицированные протоколы оценки совокупной экспозиции от смешанных загрязнителей, а нормативы на упаков-

вочные мигранты в странах ЕАЭС существенно уступают по жёсткости требованиям ЕС.

На уровне методов анализа заметна тенденция к доминированию подходов многокомпонентного анализа на основе хромато-масс-спектрометрии (GC-MS, LC-MS/MS), что согласуется с выводами Kumari et al. (2021), однако в практике, сохраняется высокая доля однофакторных экспресс-методов с ограниченной специфичностью. Это указывает на необходимость институционального укрепления лабораторной базы и адаптации валидированных методик под локальные условия.

Важно отметить, что в отличие от ранее опубликованных обзоров, в которых акцент делался на нормативно-аналитическую составляющую (например, BfR, 2019; CODEX, 2021), в настоящем исследовании предпринята попытка связать химическую контаминацию с реальной логистикой пищевого цикла — от этапов переработки до условий хранения и упаковки. Это позволяет рассматривать загрязнение не только как химико-аналитический факт, но и как следствие технологических решений, нормативных компромиссов и инфраструктурных ограничений.

Наконец, выявленные в ходе анализа пробелы (ограниченность географического охвата, фокус на традиционных загрязнителях, отсутствие исследований по кумулятивным эффектам) позволяют сформулировать обоснованные направления дальнейших исследований. К их числу относятся разработка протоколов комплексного анализа сложных матриц, изучение комбинированного токсического действия веществ различной природы, а также расширение географического спектра мониторинга, особенно за счёт включения стран Азии, Ближнего Востока и Латинской Америки, где производство готовой продукции растёт особенно быстро, но система химического контроля часто фрагментирована или недостаточно прозрачна. Новые данные об источниках контаминации, токсичности, кумулятивных эффектах и трансформации исходных соединений, расширение географии исследований позволят унифицировать существующие подходы к категоризации загрязнителей готовой продукции с учётом технологических стадий производства и антропогенной нагрузки в отдельных регионах, что в свою очередь даст возможность разработки более универсальных моделей оценки риска и сопоставления их результатов несмотря на различия нормативных требований в раз-

ных странах. Таким образом, внося вклад в уточнение структуры исследовательского поля, настоящий обзор демонстрирует потенциал предметно ориентированных картографирующих стратегий как инструмента научной ориентации, позволяющего не только фиксировать накопленные знания, но и направлять развитие исследовательской и нормативной повестки в области химической безопасности пищевой продукции.

Ограничения исследования

Во-первых, анализ охватывал преимущественно публикации на русском и английском языках, что может снижать полноту картины в глобальном контексте. Во-вторых, исключение серой литературы, а также отчётов регионального уровня, может ограничивать представление о локальной специфике, особенно для стран с высокой долей неформального производства. В-третьих, как и большинство обзоров предметного поля, данная работа не предусматривала формальной оценки качества источников, что необходимо учитывать при интерпретации результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящий обзор был направлен на картографирование современного состояния знаний о химической контаминации готовой пищевой продукции, с акцентом на типы загрязнителей, стадии их поступления, применяемые аналитические методы и нормативные практики контроля. Включение как академических, так и ведомственных источников позволило сформировать целостное представление о структуре исследовательского поля и выявить ключевые направления его развития.

Результаты обзора указывают на наличие устойчивых исследовательских кластеров, а также на значительные пробелы — как в тематическом охвате, так и в методологических подходах. Обнаруженная фрагментарность данных, особенно в отношении сложных пищевых матриц, кумулятивных эффектов загрязнителей и региональной вариативности нормативов, подчеркивает необходимость дальнейших системных исследований в данном направлении.

Представленная работа не предусматривала количественного синтеза и оценки качества включённых источников, что соответствует методологическим установкам обзора предметного поля и обусловлено

задачей аналитического описания исследовательского ландшафта. Вклад настоящего обзора заключается в структурировании разнородных данных и формулировании перспективных направлений дальнейших исследований в области химической безопасности готовой продукции.

Обобщённые в обзоре результаты могут быть использованы в качестве аналитической основы при планировании эмпирических, нормативных и межведомственных инициатив, направленных на совершенствование механизмов контроля, снижение рисков химической экспозиции и укрепление потребительской безопасности в условиях усложняющихся производственно-логистических цепей.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Ольга Игоревна Лаврухина: концептуализация; методология; написание-рецензирование и редактирование рукописи; визуализация.

Дмитрий Алексеевич Макаров: методология; написание-рецензирование и редактирование рукописи.

Елизавета Сергеевна Козеичева: сбор данных, подготовка и создание рукописи; ее комментирование.

Татьяна Викторовна Балагула: курирование данных; написание — подготовка черновика рукописи.

Алексей Викторович Третьяков: научное руководство исследованием; подготовка и создание черновика рукописи.

Мария Александровна Гергель: сбор данных; подготовка и создание черновика рукописи.

Евгения Александровна Лозовая: сбор данных; подготовка и создание черновика рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Olga I. Lavrukhina: conceptualization; methodology; manuscript writing; reviewing and editing; visualization.

Dmitry A. Makarov: methodology; manuscript writing, reviewing and editing.

Elizaveta S. Kozeicheva: data collection; manuscript preparation; comments.

Tatiana V. Balagula: data curation; draft manuscript preparation.

Alexey V. Tretyakov: scientific advising; draft manuscript preparation.

Maria A. Gergel: data collection; draft manuscript preparation.

Evgeniya A. Lozovaya: data collection; draft manuscript preparation.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность отделу «Аналитический центр» ФГБУ «ВГНКИ» и Отделу организации проведения лабораторных исследований в сфере ветеринарии Управления государственного ветеринарного надзора Россельхознадзора.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to the department «Analytical Center» of the FGBI «VGNKI» and the Department of the organization of laboratory research in the field of veterinary medicine, Directorate for Domestic Veterinary Surveillance, Rosselkhoz nadzor.

ЛИТЕРАТУРА

- Амелин, В. Г., Шаока, З. А. Ч., & Большаков, Д. С. (2023). Идентификация и аутентификация сухого коровьего молока с использованием смартфона и хеометрического анализа. *Вестник Московского Университета. Серия 2: Химия*, 64(1), 49–59. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9384-2-2023-64-1-49-59>
- Амелин, В. Г., Шаока, З. А. Ч., Большаков, Д. С., & Третьяков, А. В. (2023). Идентификация и аутентификация растительных масел методом цифровой цветометрии и хеометрического анализа. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 89(2), 5–12. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-2-1-5-12>
- Амелин, В. Г., Шаока, З. А. Ч., Большаков, Д. С., Третьяков, А. В., Нестеренко, И. С., & Киш, Л. К. (2023). Установление порчи морепродуктов методом цифровой цветометрии индикаторных тест-систем. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 89(9), 25–33. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-9-25-33>

- Балагула, Т. В., Лаврухина, О. И., Батов, И. В., Макаров, Д. А., & Третьяков, А. В. (2023). Антибиотики в ветеринарии: Загрязнение продукции животноводства. *Международный Вестник Ветеринарии*, 4, 174–179. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.4.174>
- Грачев С.А., Третьяков А.В., Амелин В.Г. (2023) Оптимизация условий пробоподготовки при определении общего содержания мышьяка в рыбе и морепродуктах методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 89(1), 5–10. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-1-5-10>
- Зайцева, Н. В., Уланова, Т. С., Карнажицкая, Т. Д., Зорина, А. С., & Пермьякова, Т. С. (2018). Определение фталатов в соковой продукции методом высокоэффективной жидкостной хроматографии/масс-спектрометрии. *Вопросы Питания*, 87(6), 117–124. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10073>
- Киш, Л. К., Третьяков, А. В., Лаврухина, О. И., Амелин, В. Г., Гергель, М. А., & Мищенко, Н. В. (2022). Продукты трансформации пестицидов и антибактериальных препаратов в пищевой продукции и продовольственном сырье (аналитический обзор). *Теоретическая и прикладная экология*, 2, 15–25. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-2-015-025>
- Лаврухина, О. И., Амелин, В. Г., Прохвятилова, Л. Б., & Ручнова, О. И. (2017). Риски загрязнения пищевых продуктов на различных стадиях их производства. *Ветеринария сегодня*, 22(3), 33–39.
- Макаров, Д. А., Козеичева, Е. С., & Хишов, А. С. (2023). Проблема загрязнения антибиотиками продукции растительного происхождения. *Контроль качества продукции*, 6, 36–41.
- Морев, А.А., & Виноградова, О.В. (2019). Определение макро- и микроэлементов в молочных, мясных, рыбных продуктах питания методом атомно-эмиссионной спектрометрии с микроволновой плазмой. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 85(3), 14–19. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-3-14-19>
- Чернова, А. В., & Петроченкова, А. В. (2023). Регламентирование содержания контаминанта акриламида в пищевой продукции. *Научные труды Дальрыбвтуза*, 63(1), 20–27.
- Abraham, A., & Rambla-Alegre, M. (2017). Marine toxins analysis for consumer protection. *Comprehensive Analytical Chemistry*, 78, 343–378. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2017.07.004>
- Adebo, O. A., Kayitesi, E., Adebiyi, J. A., Gbashi, S., Temba, M. C., Lasekan, A., Phoku, J. Z., & Njobeh, P. B. (2017). Mitigation of acrylamide in foods: An African perspective. In B. S. R. Reddy (Ed.), *Acrylic polymers in healthcare*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68982>
- Alamri, M. S., Qasem, A. A. A., Mohamed, A. A., Hussain, S., Ibraheem, M. A., Shamlan, G., Alqah, H. A., & Qasha, A. S. (2021). Food packaging's materials: A food safety perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(8), 4490–4499. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.047>
- Albaseer, S. S. (2019). Factors controlling the fate of pyrethroids residues during post-harvest processing of raw agricultural crops: An overview. *Food Chemistry*, 295, 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.109>
- Amelin, V. G., Emelyanov, O. E., Tretyakov, A. V., & Kish, L. K. (2024). Identification and detection of adulterated butter by colorimetry and Near-IR-Spectroscopy. *Journal of Applied Spectroscopy*, 91(4), 826–834. <https://doi.org/10.1007/s10812-024-01790-0>
- Amelin, V. G., Korotkov, A. G., & Andoralov, A. M. (2016). Identification and determination of 492 contaminants of different classes in food and feed by high-resolution mass spectrometry using the standard addition method. *Journal of AOAC International*, 99(6), 1600–1618. <https://doi.org/10.5740/jaoacint.16-0069>
- Amelin, V. G., Lavrukina O. I. (2017) Food safety assurance using methods of chemical analysis. *Journal of Analytical Chemistry*, 72(1), 1–46. <https://doi.org/10.1134/S1061934817010038>
- Amelin, V. G., Shogah, Z. A. Ch., & Tretyakov, A. V. (2024). Analyzing dairy products: Measuring milk fat mass fraction and detecting adulteration using the PhotoMetrix Pro® Smartphone App. *Journal of Analytical Chemistry*, 79(1), 50–56. <https://doi.org/10.1134/S1061934824010039>
- Amyot, M., Husser, E., St-Fort, K., & Ponton, D. E. (2023). Effect of cooking temperature on metal concentrations and speciation in fish muscle and seal liver. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115184>
- Artiaga, G., Ramos, K., Ramos, L., Cámara, C., & Gómez-Gómez, M. (2015). Migration and characterisation of nanosilver from food containers by AF4-ICP-MS. *Food Chemistry*, 166, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.139>

- Baesu, A., & Bayen, S. (2022). Application of nontarget analysis and high-resolution mass spectrometry for the identification of thermal transformation products of oxytetracycline in Pacific White shrimp. *Journal of Food Protection*, 85(10), 1469–1478. <https://doi.org/10.4315/JFP-22-128>
- Bai, M., Tang, R., Li, G., She, W., Chen, G., Shen, H., Zhu, S., Zhang, H., & Wu, H. (2022). High-throughput screening of 756 chemical contaminants in aquaculture products using liquid chromatography/quadrupole time-of-flight mass spectrometry. *Food Chemistry: X*, 15, 100380. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100380>
- Bianco, M., Calvano, C. D., Ventura, G., Losito, I., & Cataldi, T. R. I. (2022). Determination of hidden milk allergens in meat-based foodstuffs by liquid chromatography coupled to electrospray ionization and high-resolution tandem mass spectrometry. *Food Control*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108443>
- Bolshakov, D. S., & Amelin, V. G. (2023). Capillary electrophoresis in assessing the quality and safety of foods. *Journal of Analytical Chemistry*, 78(7), 815–855. <https://doi.org/10.1134/S106193482307002X>
- Brown, K., Blake, R. S., & Dennany, L. (2022). Electrochemiluminescence within veterinary Science: A review. *Bioelectrochemistry*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2022.108156>
- Buculei, A., Amariei, S., Oroian, M., Gutt, G., Gaceu, L., & Birca, A. (2014). Metals migration between product and metallic package in canned meat. *LWT — Food Science and Technology*, 58(2), 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.06.003>
- Bumbudsanpharoke, N., & Ko, S. (2015). Nano-food packaging: An overview of market, migration research, and safety regulations. *Journal of Food Science*, 80(5), R910–R923. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12861>
- Cao, H., Wang, Z., Meng, J., Du, M., Pan, Y., Zhao, Y., & Liu, H. (2022). Determination of arsenic in Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*): Effects of cooking and gastrointestinal digestion on food safety. *Food Chemistry*, 393, 133345. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133345>
- Capita, R., & Alonso-Calleja, C. (2013). Antibiotic-resistant bacteria: A challenge for the food industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(1), 11–48. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.519837>
- Carballo, D., Moltó, J. C., Berrada, H., & Ferrer, E. (2018). Presence of mycotoxins in ready-to-eat food and subsequent risk assessment. *Food and Chemical Toxicology*, 121, 558–565. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.09.054>
- CEF. (2015). Scientific opinion on the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs. *EFSA Journal*, 13(1), 3978. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.3978>
- Cheyns, K., Waegeneers, N., Van de Wiele, T., & Ruttens, A. (2017). Arsenic release from foodstuffs upon food preparation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(11), 2443–2453. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b05721>
- Constantinou, M., Louca-Christodoulou, D., & Agapiou, A. (2021). Method validation for the determination of 314 pesticide residues using tandem MS systems (GC–MS/MS and LC–MS/MS) in raisins: Focus on risk exposure assessment and respective processing factors in real samples (a pilot survey). *Food Chemistry*, 360. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129964>
- CONTAM. (2016a). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA Journal*, 14(6). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4501>
- CONTAM. (2016b). Risks for human health related to the presence of 3- and 2-monochloropropanediol (MCPD), and their fatty acid esters, and glycidyl fatty acid esters in food. *EFSA Journal*, 14(5), 4426. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4426>
- Crews, C., Chiodini, A., Granvogl, M., Hamlet, C., Hrnčič, K., Kuhlmann, J., Lampen, A., Scholz, G., Weisshaar, R., Wenzl, T., Jasti, P. R., & Seefelder, W. (2013). Analytical approaches for MCPD esters and glycidyl esters in food and biological samples: a review and future perspectives. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 30(1), 11–45. <https://doi.org/10.1080/19440049.2012.720385>
- Cuadrado, C., Sanchiz, A., Arribas, C., Pedrosa, M. M., Gamboa, P., Betancor, D., Blanco, C., Cabanillas, B., & Linacero, R. (2023). Mitigation of peanut allergenic reactivity by combined processing: Pressured heating and enzymatic hydrolysis. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103383>
- Cunningham, B. E., Sharpe, E. E., Brander, S. M., Landis, W. G., & Harper, S. L. (2023). Critical gaps in nanoplastics research and their connection to risk assessment. *Frontiers in Toxicology*, 5, 1154538. <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1154538>

- Custodio-Mendoza, J. A., Sendón, R., de Quirós, A. R.-B., Lorenzo, R. A., & Carro, A. M. (2023). Development of a QuEChERS method for simultaneous analysis of 3-Monochloropropane-1,2-diol monoesters and Glycidyl esters in edible oils and margarine by LC-APCI-MS/MS. *Analytica Chimica Acta*, 1239, 340712. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.340712>
- Darwish, W. S., Chiba, H., El-Ghareeb, W. R., Elhelaly, A. E., & Hui, S. P. (2019). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbon content in heat-treated meat retailed in Egypt: Health risk assessment, benzo[a]pyrene induced mutagenicity and oxidative stress in human colon (CaCo-2) cells and protection using rosmarinic and ascorbic acids. *Food Chemistry*, 290, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.127>
- Deng, S., Bai, X., Li, Y., Wang, B., Kong, B., Liu, Q., & Xia, X. (2021). Changes in moisture, colour, residual nitrites and N-nitrosamine accumulation of bacon induced by nitrite levels and dry-frying temperatures. *Meat Science*, 181, 108604. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108604>
- Di Bella, G., Potorti, A. G., Lo Turco, V., Saitta, M., & Dugo, G. (2014). Plasticizer residues by HRGC-MS in espresso coffees from capsules, pods and moka pots. *Food Control*, 41, 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.01.026>
- Dias, C., Costa, J., Mafra, I., Fernandes, D., Brandão, A. T. S. C., Silva, A. F., Pereira, C. M., & Costa, R. (2024). Electrochemical immunosensor for point-of-care detection of soybean Gly m TI allergen in foods. *Talanta*, 268, 125284. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.125284>
- Ding, T., & Li, Y. (2024). Biogenic amines are important indices for characterizing the freshness and hygienic quality of aquatic products: A review. *LWT*, 194, 115793. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115793>
- Djordjevic, T., & Djurovic-Pejcev, R. (2016). Food processing as a means for pesticide residue dissipation. *Pesticidi i Fitomedicina*, 31(3–4), 89–105. <https://doi.org/10.2298/pif1604089d>
- Dong, X., & Raghavan, V. (2022). Recent advances of selected novel processing techniques on shrimp allergenicity: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 124, 334–344. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.024>
- Drewnowska, M., Sapór, A., Jarzyńska, G., Nnorom, I. C., Sajwan, K. S., & Falandysz, J. (2012). Mercury in Russula mushrooms: Bioconcentration by Yellow-ocher Brittle Gills Russula ochroleuca. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(11), 1577–1591. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.680420>
- Duedahl-Olesen, L., Wilde, A. S., Dagnæs-Hansen, M. P., Mikkelsen, A., Olesen, P. T., & Granby, K. (2022). Acrylamide in commercial table olives and the effect of domestic cooking. *Food Control*, 132, 108515. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108515>
- Dykes, G. A., Coorey, R., Ravensdale, J. T., & Sarjit, A. (2019). Phosphates. In L. Melton, F. Shahidi, & P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of food chemistry* (pp. 218–224). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21583-7>
- Edna Hee, P. T., Liang, Z., Zhang, P., & Fang, Z. (2024). Formation mechanisms, detection methods and mitigation strategies of acrylamide, polycyclic aromatic hydrocarbons and heterocyclic amines in food products. *Food Control*, 158, 110236. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110236>
- El Qacemi, M., Rendine, S., & Maienfisch, P. (2018). Recent applications of fluorine in crop protection-new discoveries originating from the unique heptafluoroisopropyl group. In G. Haufe & F. R. Leroux (Eds.), *Fluorine in life sciences: Pharmaceuticals, medicinal diagnostics, and agrochemicals progress in fluorine science series* (pp. 607–629). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812733-9.00017-9>
- El-Saber Batiha, G., Hussein, D. E., Algammal, A. M., George, T. T., Jeandet, P., Al-Snafi, A. E., Tiwari, A., Pagnossa, J. P., Lima, C. M., Thorat, N. D., Zahoor, M., El-Esawi, M., Dey, A., Alghamdi, S., Hetta, H. F., & Cruz-Martins, N. (2021). Application of natural antimicrobials in food preservation: Recent views. *Food Control*, 126, 108066. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108066>
- Eymar, E., Garcia-Delgado, C., & Esteban, R. M. (2016). Food Poisoning: Classification. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 56–66). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00317-2>
- Fan, M., Xu, X., Lang, W., Wang, W., Wang, X., Xin, A., Zhou, F., Ding, Z., Ye, X., & Zhu, B. (2023). Toxicity, formation, contamination, determination and mitigation of acrylamide in thermally processed plant-based foods and herbal medicines: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115059>
- FAO. (2017). Food safety risk management. Evidence-informed policies and decisions, considering multiple factors. 4 — *Food safety and quality series*. FAO.

- FAO/WHO. (2013). *Public health risks of histamine and other biogenic amines from fish and fishery products*. FAO.
- FAO/WHO. (2024). *Report 2023: Pesticide residues in food — Joint FAO/WHO meeting on pesticide residues*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc9755en>
- Fong, F. L. Y., El-Nezami, H., & Sze, E. T. P. (2021). Biogenic amines — Precursors of carcinogens in traditional Chinese fermented food. *NFS Journal*, 23, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2021.04.002>
- Fujii, Y., Harada, K. H., Nakamura, T., Kato, Y., Ohta, C., Koga, N., Kimura, O., Endo, T., Koizumi, A., & Haraguchi, K. (2020). Perfluorinated carboxylic acids in edible clams: A possible exposure source of perfluorooctanoic acid for Japanese population. *Environmental Pollution*, 263, 114369. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114369>
- Gajda, A., Bladek, T., Gbylik-Sikorska, M., & Posyniak, A. (2017). The influence of cooking procedures on doxycycline concentration in contaminated eggs. *Food Chemistry*, 221, 1666–1670. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.121>
- Gallardo-Ramos, J. A., Marín-Sáez, J., Sanchis, V., Gámiz-Gracia, L., García-Campaña, A. M., Hernández-Mesa, M., & Cano-Sancho, G. (2024). Simultaneous detection of mycotoxins and pesticides in human urine samples: A 24-h diet intervention study comparing conventional and organic diets in Spain. *Food and Chemical Toxicology*, 188, 114650. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2024.114650>
- Ganjeh, A. M., Moreira, N., Pinto, C. A., Casal, S., & Saraiva, J. A. (2024). The effects of high-pressure processing on biogenic amines in food: A review. *Food and Humanity*, 2, 100252. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100252>
- Ghahremani, M.-H., Ghazi-Khansari, M., Farsi, Z., Yazdanfar, N., Jahanbakhsh, M., & Sadighara, P. (2024). Bisphenol A in dairy products, amount, potential risks, and the various analytical methods, a systematic review. *Food Chemistry: X*, 21, 101142. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101142>
- Gmoshinski, I. V., Shipelin, V. A., Kolobanov, A. I., Sokolov, I. E., Maisaya, K. Z., & Khotimchenko, S. A. (2023). Methods for the identification and quantification of microplastics in foods (A review). *Problems of Nutrition*, 92(5), 87–102. <https://doi.org/10.33029/0042–8833-2023–92–5–87–102>
- Goh, K. M., Wong, Y. H., Tan, C. P., & Nyam, K. L. (2021). A summary of 2-, 3-MCPD esters and glycidyl ester occurrence during frying and baking processes. *Current Research in Food Science*, 4, 460–469. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.002>
- Gorecki, S., Bemrah, N., Roudot, A.-C., Marchioni, E., Le Bizec, B., Faivre, F., Kadawathagedara, M., Botton, J., & Rivière, G. (2017). Human health risks related to the consumption of foodstuffs of animal origin contaminated by bisphenol A. *Food and Chemical Toxicology*, 110, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.10.045>
- Grusie, T., Cowan, V., Singh, J., McKinnon, J., & Blakley, B. (2018). Proportions of predominant Ergot alkaloids (*Claviceps purpurea*) detected in Western Canadian grains from 2014 to 2016. *World Mycotoxin Journal*, 11(2), 259–264. <https://doi.org/10.3920/WMJ2017.2241>
- Haque, M. A., Wang, Y., Shen, Z., Li, X., Saleemi, M. K., & He, C. (2020). Mycotoxin contamination and control strategy in human, domestic animal and poultry: A review. *Microbial Pathogenesis*, 142, 104095. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104095>
- Hassoun, A., Pasti, L., Chenet, T., Rusanova, P., Smaoui, S., Ait-Kaddour, A., & Bono, G. (2023). Detection methods of micro and nanoplastics. In F. Özogul (Ed.), *Advances in food and nutrition research* (vol. 103, pp. 175–227). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2022.08.002>
- Heo, D.-G., Lee, D.-C., Kwon, Y.-M., Seol, M.-J., Moon, J. S., Chung, S. M., & Kim, J.-H. (2022). Simultaneous determination of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid in Korean sera using LC-MS/MS. *Journal of Chromatography B*, 1192, 123138. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2022.123138>
- Hernandez-Ledesma, B., & Herrero, M. (Eds.). (2013). *Bioactive Compounds from Marine Foods: Plant and Animal Sources*. Wiley-Blackwell.
- Huang, J. Y., Li, X., & Zhou, W. (2015). Safety assessment of nanocomposite for food packaging application. *Trends in Food Science & Technology*, 45(2), 187–199. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.002>
- Huang, M., & Penning, T. M. (2014). Processing Contaminants: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). In Y. Motarjemi (Ed.), *Encyclopedia of food safety* (vol. 2, pp. 416–423). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00212-2>

- Huang, Z., Qu, Y., Hua, X., Wang, F., Jia, X., & Yin, L. (2023). Recent advances in soybean protein processing technologies: A review of preparation, alterations in the conformational and functional properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 248, 125862. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125862>
- Iqbal, S. Z., Rabbani, T., Asi, M. R., & Jinap, S. (2014). Assessment of aflatoxins, ochratoxin A and zearalenone in breakfast cereals. *Food Chemistry*, 157, 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.129>
- Izzo, L., Narváez, A., Castaldo, L., Gaspari, A., Rodríguez-Carrasco, Y., Grosso, M., & Ritieni, A. (2022). Multiclass and multi-residue screening of mycotoxins, pharmacologically active substances, and pesticides in infant milk formulas through ultra-high-performance liquid chromatography coupled with high-resolution mass spectrometry analysis. *Journal of Dairy Science*, 105(4), 2948–2962. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21123>
- Izzo, L., Rodríguez-Carrasco, Y., Tolosa, J., Graziani, G., Gaspari, A., & Ritieni, A. (2020). Target analysis and retrospective screening of mycotoxins and pharmacologically active substances in milk using an ultra-high-performance liquid chromatography/high-resolution mass spectrometry approach. *Journal of Dairy Science*, 103(2), 1250–1260. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17277>
- Jia, Q., Liao, G., Chen, L., Qian, Y., Yan, X., & Qiu, J. (2024). Pesticide residues in animal-derived food: Current state and perspectives. *Food Chemistry*, 438, 137974. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137974>
- Jooste, P. J., Anelich, L., & Motarjemi, Y. (2014). Safety of food and beverages: Milk and dairy products. In Y. Motarjemi (Ed.), *Encyclopedia of food safety* (vol. 3, pp. 285–296). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00286-9>
- Kobun, R. (Ed.). (2021). Biosensor technology to detect chemical contamination in food. In *Advanced food analysis tools* (pp. 127–146). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820591-4.00007-4>
- Kohli, G. S., Papiol, G. G., Rhodes, L. L., Harwood, D. T., Selwood, A., Jerrett, A., Murray, S. A., & Neilan, B. A. (2014). A feeding study to probe the uptake of Maitotoxin by snapper (*Pagrus auratus*). *Harmful Algae*, 37, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2014.05.018>
- Kovalchuk, Y., Podurets, A., Osmolovskaya, O., Nugbienyo, L., & Bulatov, A. (2024). Layered double hydroxide nanoparticles for a smartphone digital image colorimetry-based determination of fluoride ions in water, milk and dental products. *Food Chemistry*, 438, 137999. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137999>
- Kumar, N., Singh, A., Sharma, D. K., & Kishore, K. (2019). Toxicity of food additives. In R. L. Singh & S. Mondal (Eds.), *Food safety and human health* (pp. 67–98). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816333-7.00003-5>
- Kuswandi, B., Futra, D., & Heng, L. Y. (2017). Nanosensors for the Detection of Food Contaminants. In A. E. Oprea & A. M. Grumezescu (Eds.), *Nanotechnology applications in food: Flavor, stability, nutrition and safety* (pp. 307–333). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811942-6.00015-7>
- Lambré, C., Barat Baviera, J. M., Bolognesi, C., Chesson, A., Cocconcelli, P. S., Crebelli, R., Gott, D. M., Grob, K., Lampi, E., Mengelers, M., Mortensen, A., Riviére, G., Silano (until December †), V., Steffensen, I., Tlustos, C., Vernis, L., Zorn, H., Batke, M., Bignami, M., & Corsini, E. (2023). Re-evaluation of the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs. *EFSA Journal*, 21(4). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.6857>
- Leal, J. F., & Cristiano, M. L. S. (2022). Marine paralytic shellfish toxins: Chemical properties, mode of action, newer analogues, and structure-toxicity relationship. *Natural Product Reports*, 39(1), 33–57. <https://doi.org/10.1039/d1np00009h>
- Lee, J.-G., Kim, S.-Y., Moon, J.-S., Kim, S.-H., Kang, D.-H., & Yoon, H.-J. (2016). Effects of grilling procedures on levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled meats. *Food Chemistry*, 199, 632–638. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.017>
- Leigh, J., & MacMahon, S. (2017). Occurrence of 3-monochloropropanediol esters and glycidyl esters in commercial infant formulas in the United States. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34(3), 356–370. <https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1276304>
- Li, J., Chen, S., Li, H., Liu, X., Cheng, J., & Ma, L. Q. (2021). Arsenic bioaccessibility in rice grains via modified physiologically-based extraction test (MPBET): Correlation with mineral elements and comparison with As relative bioavailability. *Environmental Research*, 198, 111198. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111198>
- Li, T., Li, J., Wang, J., Xue, K. S., Su, X., Qu, H., Duan, X., & Jiang, Y. (2024). The occurrence and management of fumonisin contamination across the food production and supply chains. *Journal of Advanced Research*, 60, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.08.001>

- Lin, Q.-B., Li, H., Zhong, H.-N., Zhao, Q., Xiao, D.-H., & Wang, Z.-W. (2014). Migration of Ti from nano-TiO₂-polyethylene composite packaging into food simulants. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 1–7. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.907505>
- Ling, M.-P., Wu, C.-H., Chen, S.-C., Chen, W.-Y., Chio, C.-P., Cheng, Y.-H., & Liao, C.-M. (2014). Probabilistic framework for assessing the arsenic exposure risk from cooked fish consumption. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(6), 1115–1128. <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9621-8>
- Liu, Y., Huang, Y., Li, L., Xiong, Y., Tong, L., Wang, F., Fan, B., & Gong, J. (2023). Effect of different agricultural conditions, practices, and processing on levels of total arsenic and species in cereals and vegetables: A review. *Food Control*, 152, 109876. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109876>
- Lo Turco, V., Di Bella, G., Potortì, A. G., Fede, M. R., & Dugo, G. (2015). Determination of plasticizer residues in tea by solid phase extraction–gas chromatography–mass spectrometry. *European Food Research and Technology*, 240(2), 451–458. <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2344-3>
- Luo, Q., Liu, Z., Yin, H., Dang, Z., Wu, P., Zhu, N., Lin, Z., & Liu, Y. (2018). Migration and potential risk of trace phthalates in bottled water: A global situation. *Water Research*, 147, 362–372. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.002>
- Mahato, D. K., Kamle, M., Sharma, B., Pandhi, S., Devi, S., Dhawan, K., Selvakumar, R., Mishra, D., Kumar, A., Arora, S., Singh, N. A., & Kumar, P. (2021). Patulin in food: A mycotoxin concern for human health and its management strategies. *Toxicon*, 198, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2021.04.027>
- Manav, Ö. G., Dinç-Zor, Ş., & Alpdoğan, G. (2019). Optimization of a modified QuEChERS method by means of experimental design for multiresidue determination of pesticides in milk and dairy products by GC–MS. *Microchemical Journal*, 144, 124–129. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.08.056>
- Manimekalai, M., Rawson, A., Sengar, A. S., & Kumar, K. S. (2019). Development, optimization, and validation of methods for quantification of veterinary drug residues in complex food matrices using liquid-chromatography — A review. *Food Analytical Methods*, 12(8), 1823–1837. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01512-9>
- Martín-Gómez, B., Stephen Elmore, J., Valverde, S., Ares, A. M., & Bernal, J. (2024). Recent applications of chromatography for determining microplastics and related compounds (bisphenols and phthalate esters) in food. *Microchemical Journal*, 197, 109903. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.109903>
- Mihindukulasuriya, S. D. F., & Lim, L. T. (2014). Nanotechnology development in food packaging: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 40(2), 149–167. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.09.009>
- Molina-Garcia, L., Santos, C. S. P., Melo, A., Fernandes, J. O., Cunha, S. C., & Casal, S. (2015). Acrylamide in chips and french fries: A novel and simple method using xanthidrol for its GC-MS determination. *Food Analytical Methods*, 8(6), 1436–1445. <https://doi.org/10.1007/s12161-014-0014-5>
- Morya, S., Amoah, A. E. D. D., & Snaebjornsson, S. O. (2020). Food poisoning hazards and their consequences over food safety. In P. Chowdhary, A. Raj, D. Verma, & Y. Akhter (Eds.), *Microorganisms for sustainable environment and health* (pp. 383–400). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00019-X>
- Muaz, K., Riaz, M., Akhtar, S., Park, S., & Ismail, A. (2018). Antibiotic residues in chicken meat: Global prevalence, threats, and decontamination strategies: A review. *Journal of Food Protection*, 81(4), 619–627. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-17-086>
- Mühlemann, M. (2014). Safety of food and beverages: Dairy products: Cheese. In Y. Motarjemi (Ed.), *Encyclopedia of Food Safety* (Vol. 3, pp. 297–308). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00415-7>
- Myrtsi, E. D., Koulocheri, S. D., & Haroutounian, S. A. (2023). A novel method for the efficient simultaneous quantification of 67 phytoestrogens in plants and foodstuffs. *Food Bioscience*, 56, 103357. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103357>
- Nerín, C., Aznar, M., & Carrizo, D. (2016). Food contamination during food process. *Trends in Food Science and Technology*, 48, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.12.004>
- Ni, M., Li, X., Zhang, L., Kumar, V., & Chen, J. (2022). Bibliometric analysis of the toxicity of Bisphenol A. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 7886. <https://doi.org/10.3390/ijerph19137886>
- Nyman, P. J., Limm, W., Begley, T. H., & Chirtel, S. J. (2014). Single-laboratory validation of a method for the determination of select volatile organic compounds in foods by using vacuum distillation

- with gas chromatography/mass spectrometry. *Journal of AOAC International*, 97(2), 510–520. <https://doi.org/10.5740/jaoacint.13-294>
- Özogul, F., & Hamed, I. (2018). Marine-based toxins and their health risk. In I. M. Holban & A. M. Grumezescu (Eds.), *Handbook of food bioengineering, Food quality: Balancing health and disease* (vol. 13, pp. 109–144). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811442-1.00003-1>
- Park, J., Yang, K.-A., Choi, Y., & Choe, J. K. (2022). Novel ssDNA aptamer-based fluorescence sensor for perfluorooctanoic acid detection in water. *Environment International*, 158, 107000. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.107000>
- Pasias, I. N., Raptopoulou, K. G., & Proestos, C. (2018). Migration from metal packaging into food. *Reference module in food science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.22528-6>
- Passos, C. P., Ferreira, S. S., Serôdio, A., Basil, E., Marková, L., Kukurová, K., Ciesarová, Z., & Coimbra, M. A. (2018). Pectic polysaccharides as an acrylamide mitigation strategy – Competition between reducing sugars and sugar acids. *Food Hydrocolloids*, 81, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.032>
- Perrone, G., Rodriguez, A., Magistà, D., & Magan, N. (2019). Insights into existing and future fungal and mycotoxin contamination of cured meats. *Current Opinion in Food Science*, 29, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.06.012>
- Perugini, M., Zezza, D., Tulini, S. M. R., Abete, M. C., Monaco, G., Conte, A., Olivieri, V., & Amorena, M. (2016). Effect of cooking on total mercury content in Norway lobster and European hake and public health impact. *Marine Pollution Bulletin*, 109(1), 521–525. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.010>
- Peters, R. J. B., Rivera, Z. H., van Bommel, G., Marvin, H. J. P., Weigel, S., & Bouwmeester, H. (2014). Development and validation of single particle ICP-MS for sizing and quantitative determination of nano-silver in chicken meat. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1007/s00216-013-7571-0>
- Peters, R. J. B., van Bommel, G., Herrera-Rivera, Z., Helsper, H. P. F. G., Marvin, H. J. P., Weigel, S., Tromp, P. C., Oomen, A. G., Rietveld, A. G., & Bouwmeester, H. (2014). Characterization of titanium dioxide nanoparticles in food products: Analytical methods to define nanoparticles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(27), 6285–6293. <https://doi.org/10.1021/jf5011885>
- Pilolli, R., Van Poucke, C., De Angelis, E., Nitride, C., de Loose, M., Gillard, N., Huet, A. C., Tranquet, O., Larré, C., Adel-Patient, K., Bernard, H., Mills, E. N. C., & Monaci, L. (2021). Discovery based high resolution MS/MS analysis for selection of allergen markers in chocolate and broth powder matrices. *Food Chemistry*, 343, 128533. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128533>
- Planche, C., Ratel, J., Blinet, P., Mercier, F., Angénieux, M., Chafey, C., Zinck, J., Marchond, N., Chevolleau, S., Marchand, P., Dervilly-Pinel, G., Guérin, T., Debrauwer, L., & Engel, E. (2017). Effects of pan cooking on micropollutants in meat. *Food Chemistry*, 232, 395–404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.049>
- Planque, M., Arnould, T., Dieu, M., Delahaut, P., Renard, P., & Gillard, N. (2016). Advances in ultra-high performance liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry for sensitive detection of several food allergens in complex and processed foodstuffs. *Journal of Chromatography A*, 1464, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2016.08.033>
- Poissant, R., Mariotti, F., Zalko, D., & Membré, J. M. (2023). Ranking food products based on estimating and combining their microbiological, chemical and nutritional risks: Method and application to Ready-To-Eat dishes sold in France. *Food Research International*, 169, 112939. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112939>
- Pudel, F., Benecke, P., Fehling, P., Anne Sigrig Freudenstein, Bertrand Matthäus, & Schwaf, A. (2011). On the necessity of edible oil refining and possible sources of 3-MCPD and glycidyl esters. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(3), 368–373. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201000460>
- Ramos, F., Santos, L., & Barbosa, J. (2017). Nitrofurant veterinary drug residues in chicken eggs. In P. Y. Hester (Ed.), *Egg innovations and strategies for improvements* (pp. 457–464). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800879-9.00043-3>
- Rana, M. S., Lee, S. Y., Kang, H. J., & Hur, S. J. (2019). Reducing veterinary drug residues in animal products: A review. *Food Science of Animal Resources*, 39(5), 687–703. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2019.e65>

- Rodriguez-Saona, L., Aykas, D. P., Borba, K. R., & Urtubia, A. (2020). Miniaturization of optical sensors and their potential for high-throughput screening of foods. *Current Opinion in Food Science*, 31, 136–150. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.04.008>
- Saha Turna, N., Chung, R., & McIntyre, L. (2024). A review of biogenic amines in fermented foods: Occurrence and health effects. *Heliyon*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24501>
- Sanchis, Y., Yusà, V., & Coscollà, C. (2017). Analytical strategies for organic food packaging contaminants. In *Journal of Chromatography A* (vol. 1490, pp. 22–46). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.01.076>
- Santonicola, S., Ferrante, M. C., Di Leo, G., Murru, N., Anastasio, A., & Mercogliano, R. (2018). Study on endocrine disruptors levels in raw milk from cow's farms: Risk assessment. *Italian Journal of Food Safety*, 7(3), 7668. <https://doi.org/10.4081/ijfs.2018.7668>
- Schilberg, R. N., Wei, S., Twagirayezu, S., & Neill, J. L. (2021). Conformational dynamics of perfluorooctanoic acid (PFOA) studied by molecular rotational resonance (MRR) spectroscopy. *Chemical Physics Letters*, 778, 138789. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138789>
- Shruti, V. C., & Kutralam-Muniasamy, G. (2024). Migration testing of microplastics in plastic food-contact materials: Release, characterization, pollution level, and influencing factors. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 170, 117421. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117421>
- Sin, J. E. V., Shen, P., Teo, G. S., Neo, L. P., Huang, L., Chua, P., Tan, M. W., Wu, Y., Li, A., Er, J. C., & Chan, S. H. (2023). Surveillance of veterinary drug residues in food commonly consumed in Singapore and assessment of dietary exposure. *Heliyon*, 9(11), e21160. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21160>
- Singh, G., Stephan, C., Westerhoff, P., Carlander, D., & Duncan, T. V. (2014). Measurement Methods to Detect, Characterize, and Quantify Engineered Nanomaterials in Foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(4), 693–704. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12078>
- Singh, L., Agarwal, T., & Simal-Gandara, J. (2023). Summarizing minimization of polycyclic aromatic hydrocarbons in thermally processed foods by different strategies. *Food Control*, 146, 109514. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109514>
- Singh, L., Varshney, J. G., & Agarwal, T. (2016). Polycyclic aromatic hydrocarbons' formation and occurrence in processed food. *Food Chemistry*, 199, 768–781. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.074>
- Smith, D. J., & Kim, M. K. (2017). Chemical Contamination of Red Meat. In D. Schrenk & A. Cartus (Eds.), *Chemical contaminants and residues in food* (2nd ed., pp. 451–489). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100674-0.00018-7>
- Sohail, M., Urooj, Z., Noreen, S., Baig, M. M. F. A., Zhang, X., & Li, B. (2023). Micro- and nanoplastics: Contamination routes of food products and critical interpretation of detection strategies. *Science of The Total Environment*, 891, 164596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164596>
- Soliño, L., & Costa, P. R. (2018). Differential toxin profiles of ciguatoxins in marine organisms: Chemistry, fate and global distribution. In *Toxicon* (vol. 150, pp. 124–143). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2018.05.005>
- Song, X., Li, R., Li, H., Hu, Z., Mustapha, A., & Lin, M. (2014). Characterization and Quantification of Zinc Oxide and Titanium Dioxide Nanoparticles in Foods. *Food and Bioprocess Technology*, 7(2), 456–462. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1071-2>
- Stadler, R. H. (2019). Introduction to the volume: Food adulteration & contamination. In L. Melton, F. Shahidi, & P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of food chemistry* (pp. 317–319). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21783-6>
- Stadler, R. H., & Theurillat, V. (2017). Heat-Generated Toxicants in foods (acrylamide, MCPD esters, glycidyl esters, furan, and related compounds). In D. Schrenk & A. Cartus (Eds.), *Chemical contaminants and residues in food* (2nd ed., pp. 171–195). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100674-0.00008-4>
- Stegelmeier, B. L., Colegate, S. M., & Brown, A. W. (2016). Dehydropyrrolizidine alkaloid toxicity, cytotoxicity, and carcinogenicity. *Toxins*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/toxins8120356>
- Stella, R., Sette, G., Moressa, A., Gallina, A., Aloisi, A. M., Angeletti, R., & Biancotto, G. (2020). LC-HRMS/MS for the simultaneous determination of four allergens in fish and swine food products. *Food Chemistry*, 331. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127276>

- Sun, X., Wang, R., Li, L., Wang, X., & Ji, W. (2021). Online extraction based on ionic covalent organic framework for sensitive determination of trace per- and polyfluorinated alkyl substances in seafoods by UHPLC-MS/MS. *Food Chemistry*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130214>
- Thakali, A., & MacRae, J. D. (2021). A review of chemical and microbial contamination in food: What are the threats to a circular food system? In *Environmental Research* (vol. 194). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110635>
- Thanushree, M. P., Sailendri, D., Yoha, K. S., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Mycotoxin contamination in food: An exposition on spices. *Trends in Food Science and Technology*, 93, 69–80. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.010>
- Theurillat, X., Mujahid, C., Eriksen, B., Griffin, A., Savage, A., Delatour, T., & Mottier, P. (2023). An LC-MS/MS method for the quantitative determination of 57 per- and polyfluoroalkyl substances at ng/kg levels in different food matrices. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 40(7), 862–877. <https://doi.org/10.1080/19440049.2023.2226771>
- Thomsen, S. T., Assunção, R., Afonso, C., Boué, G., Cardoso, C., Cubadda, F., Garre, A., Kruisselbrink, J. W., Mantovani, A., Pitter, J. G., Poulsen, M., Verhagen, H., Ververis, E., Voet, H. van der, Watzl, B., & Pires, S. M. (2022). Human health risk–benefit assessment of fish and other seafood: a scoping review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(27), 7479–7502. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1915240>
- Tian, L., & Bayen, S. (2018). Thermal degradation of chloramphenicol in model solutions, spiked tissues and incurred samples. *Food Chemistry*, 248, 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.043>
- Tolosa, J., Rodríguez-Carrasco, Y., Ruiz, M. J., & Vila-Donat, P. (2021). Multi-mycotoxin occurrence in feed, metabolism and carry-over to animal-derived food products: A review. *Food and Chemical Toxicology*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112661>
- Torre, R., Freitas, M., Costa-Rama, E., Nouws, H. P. A., & Delerue-Matos, C. (2022). Food allergen control: Tropomyosin analysis through electrochemical immunosensing. *Food Chemistry*, 396. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133659>
- Ulanova, T. S., Karnazhitskaya, T. D., Zelenkin, S. E., & Zorina, A. S. (2021). Phthalate analysis in foods for young children using LC-MS method. *Problems of Nutrition*, 90(2), 128–137. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-2-128-137>
- Upadhyay, M. K., Shukla, A., Yadav, P., & Srivastava, S. (2019). A review of arsenic in crops, vegetables, animals and food products. *Food Chemistry*, 276, 608–618. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.069>
- Van der Fels-Klerx, H. J., Van Asselt, E. D., Raley, M., Poulsen, M., Korsgaard, H., Bredsdorff, L., Nauta, M., D'agostino, M., Coles, D., Marvin, H. J. P., & Frewer, L. J. (2018). Critical review of methods for risk ranking of food-related hazards, based on risks for human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(2), 178–193. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1141165>
- Vidaček, S. (2013). Seafood. In *Food safety management: A practical guide for the food industry* (pp. 189–212). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381504-0.00008-1>
- Vitali, C., Peters, R. J. B., Janssen, H. G., & Nielen, M. W. F. (2023). Microplastics and nanoplastics in food, water, and beverages; part I. occurrence. *TrAC — Trends in Analytical Chemistry*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116670>
- Vitali, C., Peters, R. J. B., Janssen, H.-G., Nielen, M. W. F., & Ruggeri, F. S. (2022). Microplastics and nanoplastics in food, water, and beverages, part II. Methods. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 157, 116819. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116819>
- Wang, R., Sang, P., Guo, Y., Jin, P., Cheng, Y., Yu, H., Xie, Y., Yao, W., & Qian, H. (2023). Cadmium in food: Source, distribution and removal. *Food Chemistry*, 405, 134666. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134666>
- Wen, A., Yuan, S., Wang, H., Mi, S., Yu, H., Guo, Y., Xie, Y., Qian, H., & Yao, W. (2024). Molecular insights on the binding of chlortetracycline to bovine casein and its effect on the thermostability of chlortetracycline. *Food Chemistry*, 432, 137104. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137104>
- Xia, H., Zhang, H., Zhu, Z., Tong, K. xuan, Chang, Q., Zhang, H., Fan, C., & Chen, H. (2024). Rapid determination of eight biogenic amines in air-dried yak meat by QuEChERS combined with ultra-performance liquid chromatography-mass spectrometry. *Journal of Food Composition and Analysis*, 133, 106466. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106466>

- Xu, X., Liu, X., Zhang, J., Liang, L., Wen, C., Li, Y., Shen, M., Wu, Y., He, X., Liu, G., & Xu, X. (2023). Formation, migration, derivation, and generation mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons during frying. *Food Chemistry*, 425, 136485. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136485>
- Zhang, J., Chen, R., Zhou, H., Wen, D., Lu, Q., Xiong, J., & Wang, C. (2024). Prevalence of aflatoxin B1 in four kinds of fermented soybean-related products used as traditional Chinese food. *LWT*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115611>
- Zhang, Y., Zhang, Y., Jia, J., Peng, H., Qian, Q., Pan, Z., & Liu, D. (2023). Nitrite and nitrate in meat processing: Functions and alternatives. *Current Research in Food Science*, 6, 100470. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100470>
- Zhang, Z., Zhang, H., Tian, D., Phan, A., Seididamyeh, M., Alanazi, M., Ping Xu, Z., Sultanbawa, Y., & Zhang, R. (2024). Luminescent sensors for residual antibiotics detection in food: Recent advances and perspectives. *Coordination Chemistry Reviews*, 498, 215455. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215455>
- Zhao, L., Szakas, T., Churley, M., & Lucas, D. (2019). Multi-class multi-residue analysis of pesticides in edible oils by gas chromatography-tandem mass spectrometry using liquid-liquid extraction and enhanced matrix removal lipid cartridge cleanup. *Journal of Chromatography A*, 1584, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.11.022>
- Zurier, H. S., & Goddard, J. M. (2021). Biodegradation of microplastics in food and agriculture. *Current Opinion in Food Science*, 37, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.09.001>

REFERENCES

- Amelin, V. G., Shogah, Z. A. Ch., & Bolshakov, D. S. (2023). Identification and authentication of cow's milk powder using a smartphone and chemometric analysis. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Chemistry*, 64, 49–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.55959/MSU0579–9384-2–2023-64–1-49–59>
- Amelin, V. G., Shogah, Z. A. Ch., Bolshakov, D. S., & Tretyakov, A. V. (2023). Identification and authentication of vegetable oils by digital colorimetry and chemometric analysis. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 89(2(1)), 5–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028–6861-2023–89-2-1-5–12>
- Amelin, V. G., Shogah, Z. A. Ch., Bolshakov, D. S., Tretyakov, A. V., Nesterenko, I. S., & Kish, L. K. (2023). Determination of seafood spoilage by digital colorimetry of indicator test systems. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 89(9), 25–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028–6861-2023–89-9–25-33>
- Balagula, T. V., Lavrukina, O. I., Batov, I. V., Makarov, D. A., & Tretyakov, A. V. (2023). Antibiotics in veterinary medicine: contamination of livestock production. *International Journal of Veterinary Medicine*, 4, 174–179. (In Russ.) <https://doi.org/10.52419/issn2072–2419.2022.4.174>
- Grachev, S. A., Tretyakov, A. V., & Amelin, V. G. (2023). Optimization of sample preparation conditions in the determination of total arsenic in fish and seafoods by atomic absorption spectrometry with electrothermal atomization. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 89(1), 5–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028–6861-2023–89-1–5-10>
- Zaytseva, N. V., Ulanova, T. S., Karnazhitskaya, T. D., Zorina, A. S., & Permyakova, T. S. (2018). Determination of phthalates in juice product by high-performance liquid chromatography/mass spectrometry. *Voprosy Pitaniia*, 87(6), 117–124. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0042–8833-2018–10073>
- Kish, L. K., Tretyakov, A. V., Lavrukina, O. I., Amelin, V. G., Gergel, M. A., & Mishchenko, N. V. (2022). Transformation products of pesticides and veterinary drugs in food and raw materials (analytical review). *Theoretical and Applied Ecology*, 2, 15–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.25750/1995–4301-2022–2-015–025>
- Lavrukina, O. I., Amelin, V. G., Prokhvatilova, L. B., & Ruchnova, O. I. (2017). Food product contamination risks at different stages of production. *Veterinary Science Today*, 22(3), 33–39. (In Russ.)
- Makarov, D. A., Kozeicheva, E. S., & Shishov, A. S. (2023). Antibiotic contamination of plant products. *Production Quality Control*, 6, 36–41. (In Russ.)

- Morev, A. A., & Vinogradova, O. V. (2019). Determination of macro- and microelements in dairy, meat, and fish food products using microwave plasma — atomic emission spectroscopy. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 85(3), 14–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-3-14-19>
- Chernova, A.V., & Petrochenkova, A.V. (2023). Regulation of the content of the contaminant acrylamide in food products. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*, 63(1), 20–27. (In Russ.)
- Чернова, А. В., & Петроченкова, А. В. (2023). Регламентирование содержания загрязнителя акриламида в пищевой продукции. *Научные труды Дальрыбвтуза*, 63(1), 20–27.
- Abraham, A., & Rambla-Alegre, M. (2017). Marine toxins analysis for consumer protection. *Comprehensive Analytical Chemistry*, 78, 343–378. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2017.07.004>
- Adebo, O. A., Kayitesi, E., Adebiyi, J. A., Gbashi, S., Temba, M. C., Lasekan, A., Phoku, J. Z., & Njobeh, P. B. (2017). Mitigation of acrylamide in foods: An African perspective. In B. S. R. Reddy (Ed.), *Acrylic polymers in healthcare*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68982>
- Alamri, M. S., Qasem, A. A. A., Mohamed, A. A., Hussain, S., Ibraheem, M. A., Shamlan, G., Alqah, H. A., & Qasha, A. S. (2021). Food packaging's materials: A food safety perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(8), 4490–4499. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.047>
- Albaseer, S. S. (2019). Factors controlling the fate of pyrethroids residues during post-harvest processing of raw agricultural crops: An overview. *Food Chemistry*, 295, 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.109>
- Amelin, V. G., Emelyanov, O. E., Tretyakov, A. V., & Kish, L. K. (2024). Identification and detection of adulterated butter by colorimetry and Near-IR-Spectroscopy. *Journal of Applied Spectroscopy*, 91(4), 826–834. <https://doi.org/10.1007/s10812-024-01790-0>
- Amelin, V. G., Korotkov, A. G., & Andoralov, A. M. (2016). Identification and determination of 492 contaminants of different classes in food and feed by high-resolution mass spectrometry using the standard addition method. *Journal of AOAC International*, 99(6), 1600–1618. <https://doi.org/10.5740/jaoacint.16-0069>
- Amelin, V. G., Lavrukhina O. I. (2017) Food safety assurance using methods of chemical analysis. *Journal of Analytical Chemistry*, 72(1), 1–46. <https://doi.org/10.1134/S1061934817010038>
- Amelin, V. G., Shogah, Z. A. Ch., & Tretyakov, A. V. (2024). Analyzing dairy products: Measuring milk fat mass fraction and detecting adulteration using the PhotoMetrix Pro® Smartphone App. *Journal of Analytical Chemistry*, 79(1), 50–56. <https://doi.org/10.1134/S1061934824010039>
- Amyot, M., Husser, E., St-Fort, K., & Ponton, D. E. (2023). Effect of cooking temperature on metal concentrations and speciation in fish muscle and seal liver. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115184>
- Artiaga, G., Ramos, K., Ramos, L., Cámara, C., & Gómez-Gómez, M. (2015). Migration and characterisation of nanosilver from food containers by AF4-ICP-MS. *Food Chemistry*, 166, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.139>
- Baesu, A., & Bayen, S. (2022). Application of nontarget analysis and high-resolution mass spectrometry for the identification of thermal transformation products of oxytetracycline in Pacific White shrimp. *Journal of Food Protection*, 85(10), 1469–1478. <https://doi.org/10.4315/JFP-22-128>
- Bai, M., Tang, R., Li, G., She, W., Chen, G., Shen, H., Zhu, S., Zhang, H., & Wu, H. (2022). High-throughput screening of 756 chemical contaminants in aquaculture products using liquid chromatography/quadrupole time-of-flight mass spectrometry. *Food Chemistry: X*, 15, 100380. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100380>
- Bianco, M., Calvano, C. D., Ventura, G., Losito, I., & Cataldi, T. R. I. (2022). Determination of hidden milk allergens in meat-based foodstuffs by liquid chromatography coupled to electrospray ionization and high-resolution tandem mass spectrometry. *Food Control*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108443>
- Bolshakov, D. S., & Amelin, V. G. (2023). Capillary electrophoresis in assessing the quality and safety of foods. *Journal of Analytical Chemistry*, 78(7), 815–855. <https://doi.org/10.1134/S106193482307002X>
- Brown, K., Blake, R. S., & Dennany, L. (2022). Electrochemiluminescence within veterinary Science: A review. *Bioelectrochemistry*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2022.108156>
- Buculei, A., Amariei, S., Oroian, M., Gutt, G., Gaceu, L., & Birca, A. (2014). Metals migration between product and metallic package in canned meat. *LWT — Food Science and Technology*, 58(2), 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.06.003>

- Bumbudsanpharoke, N., & Ko, S. (2015). Nano-food packaging: An overview of market, migration research, and safety regulations. *Journal of Food Science*, 80(5), R910–R923. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12861>
- Cao, H., Wang, Z., Meng, J., Du, M., Pan, Y., Zhao, Y., & Liu, H. (2022). Determination of arsenic in Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*): Effects of cooking and gastrointestinal digestion on food safety. *Food Chemistry*, 393, 133345. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133345>
- Capita, R., & Alonso-Calleja, C. (2013). Antibiotic-resistant bacteria: A challenge for the food industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(1), 11–48. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.519837>
- Carballo, D., Moltó, J. C., Berrada, H., & Ferrer, E. (2018). Presence of mycotoxins in ready-to-eat food and subsequent risk assessment. *Food and Chemical Toxicology*, 121, 558–565. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.09.054>
- CEF. (2015). Scientific opinion on the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs. *EFSA Journal*, 13(1), 3978. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.3978>
- Cheyns, K., Waegeneers, N., Van de Wiele, T., & Ruttens, A. (2017). Arsenic release from foodstuffs upon food preparation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(11), 2443–2453. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b05721>
- Constantinou, M., Louca-Christodoulou, D., & Agapiou, A. (2021). Method validation for the determination of 314 pesticide residues using tandem MS systems (GC–MS/MS and LC–MS/MS) in raisins: Focus on risk exposure assessment and respective processing factors in real samples (a pilot survey). *Food Chemistry*, 360. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129964>
- CONTAM. (2016a). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA Journal*, 14(6). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4501>
- CONTAM. (2016b). Risks for human health related to the presence of 3- and 2-monochloropropanediol (MCPD), and their fatty acid esters, and glycidyl fatty acid esters in food. *EFSA Journal*, 14(5), 4426. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4426>
- Crews, C., Chiodini, A., Granvogl, M., Hamlet, C., Hrnčířik, K., Kuhlmann, J., Lampen, A., Scholz, G., Weisshaar, R., Wenzl, T., Jasti, P. R., & Seefelder, W. (2013). Analytical approaches for MCPD esters and glycidyl esters in food and biological samples: a review and future perspectives. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 30(1), 11–45. <https://doi.org/10.1080/19440049.2012.720385>
- Cuadrado, C., Sanchiz, A., Arribas, C., Pedrosa, M. M., Gamboa, P., Betancor, D., Blanco, C., Cabanillas, B., & Linacero, R. (2023). Mitigation of peanut allergenic reactivity by combined processing: Pressured heating and enzymatic hydrolysis. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103383>
- Cunningham, B. E., Sharpe, E. E., Brander, S. M., Landis, W. G., & Harper, S. L. (2023). Critical gaps in nanoplastics research and their connection to risk assessment. *Frontiers in Toxicology*, 5, 1154538. <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1154538>
- Custodio-Mendoza, J. A., Sendón, R., de Quirós, A. R.-B., Lorenzo, R. A., & Carro, A. M. (2023). Development of a QuEChERS method for simultaneous analysis of 3-Monochloropropane-1,2-diol monoesters and Glycidyl esters in edible oils and margarine by LC-APCI-MS/MS. *Analytica Chimica Acta*, 1239, 340712. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.340712>
- Darwish, W. S., Chiba, H., El-Ghareeb, W. R., Elhelaly, A. E., & Hui, S. P. (2019). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbon content in heat-treated meat retailed in Egypt: Health risk assessment, benzo[a]pyrene induced mutagenicity and oxidative stress in human colon (CaCo-2) cells and protection using rosmarinic and ascorbic acids. *Food Chemistry*, 290, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.127>
- Deng, S., Bai, X., Li, Y., Wang, B., Kong, B., Liu, Q., & Xia, X. (2021). Changes in moisture, colour, residual nitrites and N-nitrosamine accumulation of bacon induced by nitrite levels and dry-frying temperatures. *Meat Science*, 181, 108604. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108604>
- Di Bella, G., Potorti, A. G., Lo Turco, V., Saitta, M., & Dugo, G. (2014). Plasticizer residues by HRGC–MS in espresso coffees from capsules, pods and moka pots. *Food Control*, 41, 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.01.026>
- Dias, C., Costa, J., Mafra, I., Fernandes, D., Brandão, A. T. S. C., Silva, A. F., Pereira, C. M., & Costa, R. (2024). Electrochemical immunosensor for point-of-care detection of soybean Gly m TI allergen in foods. *Talanta*, 268, 125284. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.125284>

- Ding, T., & Li, Y. (2024). Biogenic amines are important indices for characterizing the freshness and hygienic quality of aquatic products: A review. *LWT*, 194, 115793. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115793>
- Djordjevic, T., & Djurovic-Pejcev, R. (2016). Food processing as a means for pesticide residue dissipation. *Pesticidi i Fitomedicina*, 31(3–4), 89–105. <https://doi.org/10.2298/pif1604089d>
- Dong, X., & Raghavan, V. (2022). Recent advances of selected novel processing techniques on shrimp allergenicity: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 124, 334–344. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.024>
- Drewnowska, M., Sapór, A., Jarzyńska, G., Nnorom, I. C., Sajwan, K. S., & Falandysz, J. (2012). Mercury in Russula mushrooms: Bioconcentration by Yellow-ocher Brittle Gills Russula ochroleuca. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(11), 1577–1591. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.680420>
- Duedahl-Olesen, L., Wilde, A. S., Dagnæs-Hansen, M. P., Mikkelsen, A., Olesen, P. T., & Granby, K. (2022). Acrylamide in commercial table olives and the effect of domestic cooking. *Food Control*, 132, 108515. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108515>
- Dykes, G. A., Coorey, R., Ravensdale, J. T., & Sarjit, A. (2019). Phosphates. In L. Melton, F. Shahidi, & P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of food chemistry* (pp. 218–224). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21583-7>
- Edna Hee, P. T., Liang, Z., Zhang, P., & Fang, Z. (2024). Formation mechanisms, detection methods and mitigation strategies of acrylamide, polycyclic aromatic hydrocarbons and heterocyclic amines in food products. *Food Control*, 158, 110236. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110236>
- El Qacemi, M., Rendine, S., & Maienfisch, P. (2018). Recent applications of fluorine in crop protection-new discoveries originating from the unique heptafluoroisopropyl group. In G. Haufe & F. R. Leroux (Eds.), *Fluorine in life sciences: Pharmaceuticals, medicinal diagnostics, and agrochemicals progress in fluorine science series* (pp. 607–629). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812733-9.00017-9>
- El-Saber Batiha, G., Hussein, D. E., Algammal, A. M., George, T. T., Jeandet, P., Al-Snafi, A. E., Tiwari, A., Pagnossa, J. P., Lima, C. M., Thorat, N. D., Zahoor, M., El-Esawi, M., Dey, A., Alghamdi, S., Hetta, H. F., & Cruz-Martins, N. (2021). Application of natural antimicrobials in food preservation: Recent views. *Food Control*, 126, 108066. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108066>
- Eymar, E., Garcia-Delgado, C., & Esteban, R. M. (2016). Food Poisoning: Classification. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 56–66). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00317-2>
- Fan, M., Xu, X., Lang, W., Wang, W., Wang, X., Xin, A., Zhou, F., Ding, Z., Ye, X., & Zhu, B. (2023). Toxicity, formation, contamination, determination and mitigation of acrylamide in thermally processed plant-based foods and herbal medicines: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115059>
- FAO. (2017). Food safety risk management. Evidence-informed policies and decisions, considering multiple factors. 4 — *Food safety and quality series*. FAO.
- FAO/WHO. (2013). *Public health risks of histamine and other biogenic amines from fish and fishery products*. FAO.
- FAO/WHO. (2024). *Report 2023: Pesticide residues in food — Joint FAO/WHO meeting on pesticide residues*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc9755en>
- Fong, F. L. Y., El-Nezami, H., & Sze, E. T. P. (2021). Biogenic amines — Precursors of carcinogens in traditional Chinese fermented food. *NFS Journal*, 23, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2021.04.002>
- Fujii, Y., Harada, K. H., Nakamura, T., Kato, Y., Ohta, C., Koga, N., Kimura, O., Endo, T., Koizumi, A., & Haraguchi, K. (2020). Perfluorinated carboxylic acids in edible clams: A possible exposure source of perfluorooctanoic acid for Japanese population. *Environmental Pollution*, 263, 114369. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114369>
- Gajda, A., Bladek, T., Gbylik-Sikorska, M., & Posyniak, A. (2017). The influence of cooking procedures on doxycycline concentration in contaminated eggs. *Food Chemistry*, 221, 1666–1670. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.121>
- Gallardo-Ramos, J. A., Marín-Sáez, J., Sanchis, V., Gámiz-Gracia, L., García-Campaña, A. M., Hernández-Mesa, M., & Cano-Sancho, G. (2024). Simultaneous detection of mycotoxins and pesticides in human urine samples: A 24-h diet intervention study comparing conventional and organic diets in Spain. *Food and Chemical Toxicology*, 188, 114650. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2024.114650>

- Ganjeh, A. M., Moreira, N., Pinto, C. A., Casal, S., & Saraiva, J. A. (2024). The effects of high-pressure processing on biogenic amines in food: A review. *Food and Humanity*, 2, 100252. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100252>
- Ghahremani, M.-H., Ghazi-Khansari, M., Farsi, Z., Yazdanfar, N., Jahanbakhsh, M., & Sadighara, P. (2024). Bisphenol A in dairy products, amount, potential risks, and the various analytical methods, a systematic review. *Food Chemistry: X*, 21, 101142. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101142>
- Gmshinski, I. V., Shipelin, V. A., Kolobanov, A. I., Sokolov, I. E., Maisaya, K. Z., & Khotimchenko, S. A. (2023). Methods for the identification and quantification of microplastics in foods (A review). *Problems of Nutrition*, 92(5), 87–102. <https://doi.org/10.33029/0042–8833–2023–92–5–87–102>
- Goh, K. M., Wong, Y. H., Tan, C. P., & Nyam, K. L. (2021). A summary of 2-, 3-MCPD esters and glycidyl ester occurrence during frying and baking processes. *Current Research in Food Science*, 4, 460–469. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.002>
- Gorecki, S., Bemrah, N., Roudot, A.-C., Marchioni, E., Le Bizec, B., Faivre, F., Kadawathagedara, M., Botton, J., & Rivière, G. (2017). Human health risks related to the consumption of foodstuffs of animal origin contaminated by bisphenol A. *Food and Chemical Toxicology*, 110, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.10.045>
- Grusie, T., Cowan, V., Singh, J., McKinnon, J., & Blakley, B. (2018). Proportions of predominant Ergot alkaloids (*Claviceps purpurea*) detected in Western Canadian grains from 2014 to 2016. *World Mycotoxin Journal*, 11(2), 259–264. <https://doi.org/10.3920/WMJ2017.2241>
- Haque, M. A., Wang, Y., Shen, Z., Li, X., Saleemi, M. K., & He, C. (2020). Mycotoxin contamination and control strategy in human, domestic animal and poultry: A review. *Microbial Pathogenesis*, 142, 104095. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104095>
- Hassoun, A., Pasti, L., Chenet, T., Rusanova, P., Smaoui, S., Ait-Kaddour, A., & Bono, G. (2023). Detection methods of micro and nanoplastics. In F. Özogul (Ed.), *Advances in food and nutrition research* (vol. 103, pp. 175–227). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2022.08.002>
- Heo, D.-G., Lee, D.-C., Kwon, Y.-M., Seol, M.-J., Moon, J. S., Chung, S. M., & Kim, J.-H. (2022). Simultaneous determination of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid in Korean sera using LC-MS/MS. *Journal of Chromatography B*, 1192, 123138. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2022.123138>
- Hernandez-Ledesma, B., & Herrero, M. (Eds.). (2013). *Bioactive Compounds from Marine Foods: Plant and Animal Sources*. Wiley-Blackwell.
- Huang, J. Y., Li, X., & Zhou, W. (2015). Safety assessment of nanocomposite for food packaging application. *Trends in Food Science & Technology*, 45(2), 187–199. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.002>
- Huang, M., & Penning, T. M. (2014). Processing Contaminants: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). In Y. Motarjemi (Ed.), *Encyclopedia of food safety* (vol. 2, pp. 416–423). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00212-2>
- Huang, Z., Qu, Y., Hua, X., Wang, F., Jia, X., & Yin, L. (2023). Recent advances in soybean protein processing technologies: A review of preparation, alterations in the conformational and functional properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 248, 125862. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125862>
- Iqbal, S. Z., Rabbani, T., Asi, M. R., & Jinap, S. (2014). Assessment of aflatoxins, ochratoxin A and zearalenone in breakfast cereals. *Food Chemistry*, 157, 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.129>
- Izzo, L., Narváez, A., Castaldo, L., Gaspari, A., Rodríguez-Carrasco, Y., Grosso, M., & Ritieni, A. (2022). Multiclass and multi-residue screening of mycotoxins, pharmacologically active substances, and pesticides in infant milk formulas through ultra-high-performance liquid chromatography coupled with high-resolution mass spectrometry analysis. *Journal of Dairy Science*, 105(4), 2948–2962. <https://doi.org/10.3168/jds.2021–21123>
- Izzo, L., Rodríguez-Carrasco, Y., Tolosa, J., Graziani, G., Gaspari, A., & Ritieni, A. (2020). Target analysis and retrospective screening of mycotoxins and pharmacologically active substances in milk using an ultra-high-performance liquid chromatography/high-resolution mass spectrometry approach. *Journal of Dairy Science*, 103(2), 1250–1260. <https://doi.org/10.3168/jds.2019–17277>
- Jia, Q., Liao, G., Chen, L., Qian, Y., Yan, X., & Qiu, J. (2024). Pesticide residues in animal-derived food: Current state and perspectives. *Food Chemistry*, 438, 137974. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137974>

- Jooste, P. J., Anelich, L., & Motarjemi, Y. (2014). Safety of food and beverages: Milk and dairy products. In Y. Motarjemi (Ed.), *Encyclopedia of food safety* (vol. 3, pp. 285–296). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00286-9>
- Kobun, R. (Ed.). (2021). Biosensor technology to detect chemical contamination in food. In *Advanced food fnalysis tools* (pp. 127–146). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820591-4.00007-4>
- Kohli, G. S., Papiol, G. G., Rhodes, L. L., Harwood, D. T., Selwood, A., Jerrett, A., Murray, S. A., & Neilan, B. A. (2014). A feeding study to probe the uptake of Maitotoxin by snapper (*Pagrus auratus*). *Harmful Algae*, 37, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2014.05.018>
- Kovalchuk, Y., Podurets, A., Osmolovskaya, O., Nugbienyo, L., & Bulatov, A. (2024). Layered double hydroxide nanoparticles for a smartphone digital image colorimetry-based determination of fluoride ions in water, milk and dental products. *Food Chemistry*, 438, 137999. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137999>
- Kumar, N., Singh, A., Sharma, D. K., & Kishore, K. (2019). Toxicity of food additives. In R. L. Singh & S. Mondal (Eds.), *Food safety and human health* (pp. 67–98). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816333-7.00003-5>
- Kuswandi, B., Futra, D., & Heng, L. Y. (2017). Nanosensors for the Detection of Food Contaminants. In A. E. Oprea & A. M. Grumezescu (Eds.), *Nanotechnology applications in food: Flavor, stability, nutrition and safety* (pp. 307–333). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811942-6.00015-7>
- Lambré, C., Barat Baviera, J. M., Bolognesi, C., Chesson, A., Cocconcelli, P. S., Crebelli, R., Gott, D. M., Grob, K., Lampi, E., Mengelers, M., Mortensen, A., Rivière, G., Silano (until December †), V., Steffensen, I., Tlustos, C., Vernis, L., Zorn, H., Batke, M., Bignami, M., & Corsini, E. (2023). Re-evaluation of the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs. *EFSA Journal*, 21(4). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.6857>
- Leal, J. F., & Cristiano, M. L. S. (2022). Marine paralytic shellfish toxins: Chemical properties, mode of action, newer analogues, and structure-toxicity relationship. *Natural Product Reports*, 39(1), 33–57. <https://doi.org/10.1039/d1np00009h>
- Lee, J.-G., Kim, S.-Y., Moon, J.-S., Kim, S.-H., Kang, D.-H., & Yoon, H.-J. (2016). Effects of grilling procedures on levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled meats. *Food Chemistry*, 199, 632–638. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.017>
- Leigh, J., & MacMahon, S. (2017). Occurrence of 3-monochloropropanediol esters and glycidyl esters in commercial infant formulas in the United States. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34(3), 356–370. <https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1276304>
- Li, J., Chen, S., Li, H., Liu, X., Cheng, J., & Ma, L. Q. (2021). Arsenic bioaccessibility in rice grains via modified physiologically-based extraction test (MPBET): Correlation with mineral elements and comparison with As relative bioavailability. *Environmental Research*, 198, 111198. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111198>
- Li, T., Li, J., Wang, J., Xue, K. S., Su, X., Qu, H., Duan, X., & Jiang, Y. (2024). The occurrence and management of fumonisin contamination across the food production and supply chains. *Journal of Advanced Research*, 60, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.08.001>
- Lin, Q.-B., Li, H., Zhong, H.-N., Zhao, Q., Xiao, D.-H., & Wang, Z.-W. (2014). Migration of Ti from nano-TiO₂-polyethylene composite packaging into food simulants. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 1–7. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.907505>
- Ling, M.-P., Wu, C.-H., Chen, S.-C., Chen, W.-Y., Chio, C.-P., Cheng, Y.-H., & Liao, C.-M. (2014). Probabilistic framework for assessing the arsenic exposure risk from cooked fish consumption. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(6), 1115–1128. <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9621-8>
- Liu, Y., Huang, Y., Li, L., Xiong, Y., Tong, L., Wang, F., Fan, B., & Gong, J. (2023). Effect of different agricultural conditions, practices, and processing on levels of total arsenic and species in cereals and vegetables: A review. *Food Control*, 152, 109876. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109876>
- Lo Turco, V., Di Bella, G., Potortì, A. G., Fede, M. R., & Dugo, G. (2015). Determination of plasticizer residues in tea by solid phase extraction–gas chromatography–mass spectrometry. *European Food Research and Technology*, 240(2), 451–458. <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2344-3>
- Luo, Q., Liu, Z., Yin, H., Dang, Z., Wu, P., Zhu, N., Lin, Z., & Liu, Y. (2018). Migration and potential risk of trace phthalates in bottled water: A global situation. *Water Research*, 147, 362–372. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.002>

- Mahato, D. K., Kamle, M., Sharma, B., Pandhi, S., Devi, S., Dhawan, K., Selvakumar, R., Mishra, D., Kumar, A., Arora, S., Singh, N. A., & Kumar, P. (2021). Patulin in food: A mycotoxin concern for human health and its management strategies. *Toxicon*, 198, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2021.04.027>
- Manav, Ö. G., Dinç-Zor, Ş., & Alpdoğan, G. (2019). Optimization of a modified QuEChERS method by means of experimental design for multiresidue determination of pesticides in milk and dairy products by GC–MS. *Microchemical Journal*, 144, 124–129. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.08.056>
- Manimekalai, M., Rawson, A., Sengar, A. S., & Kumar, K. S. (2019). Development, optimization, and validation of methods for quantification of veterinary drug residues in complex food matrices using liquid-chromatography — A review. *Food Analytical Methods*, 12(8), 1823–1837. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01512-9>
- Martín-Gómez, B., Stephen Elmore, J., Valverde, S., Ares, A. M., & Bernal, J. (2024). Recent applications of chromatography for determining microplastics and related compounds (bisphenols and phthalate esters) in food. *Microchemical Journal*, 197, 109903. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.109903>
- Mihindukulasuriya, S. D. F., & Lim, L. T. (2014). Nanotechnology development in food packaging: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 40(2), 149–167. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.09.009>
- Molina-Garcia, L., Santos, C. S. P., Melo, A., Fernandes, J. O., Cunha, S. C., & Casal, S. (2015). Acrylamide in chips and french fries: A novel and simple method using xanthidol for its GC-MS determination. *Food Analytical Methods*, 8(6), 1436–1445. <https://doi.org/10.1007/s12161-014-0014-5>
- Morya, S., Amoah, A. E. D. D., & Snaebjornsson, S. O. (2020). Food poisoning hazards and their consequences over food safety. In P. Chowdhary, A. Raj, D. Verma, & Y. Akhter (Eds.), *Microorganisms for sustainable environment and health* (pp. 383–400). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00019-X>
- Muaz, K., Riaz, M., Akhtar, S., Park, S., & Ismail, A. (2018). Antibiotic residues in chicken meat: Global prevalence, threats, and decontamination strategies: A review. *Journal of Food Protection*, 81(4), 619–627. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-17-086>
- Mühlemann, M. (2014). Safety of food and beverages: Dairy products: Cheese. In Y. Motarjemi (Ed.), *Encyclopedia of Food Safety* (Vol. 3, pp. 297–308). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00415-7>
- Myrtsi, E. D., Koulocheri, S. D., & Haroutounian, S. A. (2023). A novel method for the efficient simultaneous quantification of 67 phytoestrogens in plants and foodstuffs. *Food Bioscience*, 56, 103357. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103357>
- Nerín, C., Aznar, M., & Carrizo, D. (2016). Food contamination during food process. *Trends in Food Science and Technology*, 48, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.12.004>
- Ni, M., Li, X., Zhang, L., Kumar, V., & Chen, J. (2022). Bibliometric analysis of the toxicity of Bisphenol A. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 7886. <https://doi.org/10.3390/ijerph19137886>
- Nyman, P. J., Limm, W., Begley, T. H., & Chirtel, S. J. (2014). Single-laboratory validation of a method for the determination of select volatile organic compounds in foods by using vacuum distillation with gas chromatography/mass spectrometry. *Journal of AOAC International*, 97(2), 510–520. <https://doi.org/10.5740/jaoacint.13-294>
- Özogul, F., & Hamed, I. (2018). Marine-based toxins and their health risk. In I. M. Holban & A. M. Grumezescu (Eds.), *Handbook of food bioengineering, Food quality: Balancing health and disease* (vol. 13, pp. 109–144). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811442-1.00003-1>
- Park, J., Yang, K.-A., Choi, Y., & Choe, J. K. (2022). Novel ssDNA aptamer-based fluorescence sensor for perfluorooctanoic acid detection in water. *Environment International*, 158, 107000. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.107000>
- Pasias, I. N., Raptopoulou, K. G., & Proestos, C. (2018). Migration from metal packaging into food. *Reference module in food science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.22528-6>
- Passos, C. P., Ferreira, S. S., Serôdio, A., Basil, E., Marková, L., Kukurová, K., Ciesarová, Z., & Coimbra, M. A. (2018). Pectic polysaccharides as an acrylamide mitigation strategy – Competition between reducing sugars and sugar acids. *Food Hydrocolloids*, 81, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.032>
- Perrone, G., Rodriguez, A., Magistà, D., & Magan, N. (2019). Insights into existing and future fungal and mycotoxin contamination of cured meats. *Current Opinion in Food Science*, 29, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.06.012>

- Perugini, M., Zezza, D., Tulini, S. M. R., Abete, M. C., Monaco, G., Conte, A., Olivieri, V., & Amorena, M. (2016). Effect of cooking on total mercury content in Norway lobster and European hake and public health impact. *Marine Pollution Bulletin*, 109(1), 521–525. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.010>
- Peters, R. J. B., Rivera, Z. H., van Bommel, G., Marvin, H. J. P., Weigel, S., & Bouwmeester, H. (2014). Development and validation of single particle ICP-MS for sizing and quantitative determination of nano-silver in chicken meat. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1007/s00216-013-7571-0>
- Peters, R. J. B., van Bommel, G., Herrera-Rivera, Z., Helsper, H. P. F. G., Marvin, H. J. P., Weigel, S., Tromp, P. C., Oomen, A. G., Rietveld, A. G., & Bouwmeester, H. (2014). Characterization of titanium dioxide nanoparticles in food products: Analytical methods to define nanoparticles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(27), 6285–6293. <https://doi.org/10.1021/jf5011885>
- Pilolli, R., Van Poucke, C., De Angelis, E., Nitride, C., de Loose, M., Gillard, N., Huet, A. C., Tranquet, O., Larré, C., Adel-Patient, K., Bernard, H., Mills, E. N. C., & Monaci, L. (2021). Discovery based high resolution MS/MS analysis for selection of allergen markers in chocolate and broth powder matrices. *Food Chemistry*, 343, 128533. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128533>
- Planche, C., Ratel, J., Blinet, P., Mercier, F., Angénieux, M., Chafey, C., Zinck, J., Marchond, N., Chevolleau, S., Marchand, P., Dervilly-Pinel, G., Guérin, T., Debrauwer, L., & Engel, E. (2017). Effects of pan cooking on micropollutants in meat. *Food Chemistry*, 232, 395–404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.049>
- Planque, M., Arnould, T., Dieu, M., Delahaut, P., Renard, P., & Gillard, N. (2016). Advances in ultra-high performance liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry for sensitive detection of several food allergens in complex and processed foodstuffs. *Journal of Chromatography A*, 1464, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2016.08.033>
- Poissant, R., Mariotti, F., Zalko, D., & Membré, J. M. (2023). Ranking food products based on estimating and combining their microbiological, chemical and nutritional risks: Method and application to Ready-To-Eat dishes sold in France. *Food Research International*, 169, 112939. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112939>
- Pudel, F., Benecke, P., Fehling, P., Anne Sigrid Freudenstein, Bertrand Matthäus, & Schwaf, A. (2011). On the necessity of edible oil refining and possible sources of 3-MCPD and glycidyl esters. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(3), 368–373. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201000460>
- Ramos, F., Santos, L., & Barbosa, J. (2017). Nitrofurant veterinary drug residues in chicken eggs. In P. Y. Hester (Ed.), *Egg innovations and strategies for improvements* (pp. 457–464). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800879-9.00043-3>
- Rana, M. S., Lee, S. Y., Kang, H. J., & Hur, S. J. (2019). Reducing veterinary drug residues in animal products: A review. *Food Science of Animal Resources*, 39(5), 687–703. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2019.e65>
- Rodriguez-Saona, L., Aykas, D. P., Borba, K. R., & Urtubia, A. (2020). Miniaturization of optical sensors and their potential for high-throughput screening of foods. *Current Opinion in Food Science*, 31, 136–150. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.04.008>
- Saha Turna, N., Chung, R., & McIntyre, L. (2024). A review of biogenic amines in fermented foods: Occurrence and health effects. *Heliyon*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24501>
- Sanchis, Y., Yusà, V., & Coscollà, C. (2017). Analytical strategies for organic food packaging contaminants. In *Journal of Chromatography A* (vol. 1490, pp. 22–46). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.01.076>
- Santonicola, S., Ferrante, M. C., Di Leo, G., Murru, N., Anastasio, A., & Mercogliano, R. (2018). Study on endocrine disruptors levels in raw milk from cow's farms: Risk assessment. *Italian Journal of Food Safety*, 7(3), 7668. <https://doi.org/10.4081/ijfs.2018.7668>
- Schilberg, R. N., Wei, S., Twagirayezu, S., & Neill, J. L. (2021). Conformational dynamics of perfluorooctanoic acid (PFOA) studied by molecular rotational resonance (MRR) spectroscopy. *Chemical Physics Letters*, 778, 138789. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138789>
- Shruti, V. C., & Kutralam-Muniasamy, G. (2024). Migration testing of microplastics in plastic food-contact materials: Release, characterization, pollution level, and influencing factors. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 170, 117421. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117421>

- Sin, J. E. V., Shen, P., Teo, G. S., Neo, L. P., Huang, L., Chua, P., Tan, M. W., Wu, Y., Li, A., Er, J. C., & Chan, S. H. (2023). Surveillance of veterinary drug residues in food commonly consumed in Singapore and assessment of dietary exposure. *Heliyon*, 9(11), e21160. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21160>
- Singh, G., Stephan, C., Westerhoff, P., Carlander, D., & Duncan, T. V. (2014). Measurement Methods to Detect, Characterize, and Quantify Engineered Nanomaterials in Foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(4), 693–704. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12078>
- Singh, L., Agarwal, T., & Simal-Gandara, J. (2023). Summarizing minimization of polycyclic aromatic hydrocarbons in thermally processed foods by different strategies. *Food Control*, 146, 109514. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109514>
- Singh, L., Varshney, J. G., & Agarwal, T. (2016). Polycyclic aromatic hydrocarbons' formation and occurrence in processed food. *Food Chemistry*, 199, 768–781. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.074>
- Smith, D. J., & Kim, M. K. (2017). Chemical Contamination of Red Meat. In D. Schrenk & A. Cartus (Eds.), *Chemical contaminants and residues in food* (2nd ed., pp. 451–489). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100674-0.00018-7>
- Sohail, M., Urooj, Z., Noreen, S., Baig, M. M. F. A., Zhang, X., & Li, B. (2023). Micro- and nanoplastics: Contamination routes of food products and critical interpretation of detection strategies. *Science of The Total Environment*, 891, 164596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164596>
- Soliño, L., & Costa, P. R. (2018). Differential toxin profiles of ciguatoxins in marine organisms: Chemistry, fate and global distribution. In *Toxicon* (vol. 150, pp. 124–143). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2018.05.005>
- Song, X., Li, R., Li, H., Hu, Z., Mustapha, A., & Lin, M. (2014). Characterization and Quantification of Zinc Oxide and Titanium Dioxide Nanoparticles in Foods. *Food and Bioprocess Technology*, 7(2), 456–462. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1071-2>
- Stadler, R. H. (2019). Introduction to the volume: Food adulteration & contamination. In L. Melton, F. Shahidi, & P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of food chemistry* (pp. 317–319). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21783-6>
- Stadler, R. H., & Theurillat, V. (2017). Heat-Generated Toxicants in foods (acrylamide, MCPD esters, glycidyl esters, furan, and related compounds). In D. Schrenk & A. Cartus (Eds.), *Chemical contaminants and residues in food* (2nd ed., pp. 171–195). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100674-0.00008-4>
- Stegelmeier, B. L., Colegate, S. M., & Brown, A. W. (2016). Dehydropyrrolizidine alkaloid toxicity, cytotoxicity, and carcinogenicity. *Toxins*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/toxins8120356>
- Stella, R., Sette, G., Moressa, A., Gallina, A., Aloisi, A. M., Angeletti, R., & Biancotto, G. (2020). LC-HRMS/MS for the simultaneous determination of four allergens in fish and swine food products. *Food Chemistry*, 331. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127276>
- Sun, X., Wang, R., Li, L., Wang, X., & Ji, W. (2021). Online extraction based on ionic covalent organic framework for sensitive determination of trace per- and polyfluorinated alkyl substances in seafoods by UHPLC-MS/MS. *Food Chemistry*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130214>
- Thakali, A., & MacRae, J. D. (2021). A review of chemical and microbial contamination in food: What are the threats to a circular food system? In *Environmental Research* (vol. 194). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110635>
- Thanushree, M. P., Sailendri, D., Yoha, K. S., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Mycotoxin contamination in food: An exposition on spices. *Trends in Food Science and Technology*, 93, 69–80. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.010>
- Theurillat, X., Mujahid, C., Eriksen, B., Griffin, A., Savage, A., Delatour, T., & Mottier, P. (2023). An LC-MS/MS method for the quantitative determination of 57 per- and polyfluoroalkyl substances at ng/kg levels in different food matrices. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 40(7), 862–877. <https://doi.org/10.1080/19440049.2023.2226771>
- Thomsen, S. T., Assunção, R., Afonso, C., Boué, G., Cardoso, C., Cubadda, F., Garre, A., Kruisselbrink, J. W., Mantovani, A., Pitter, J. G., Poulsen, M., Verhagen, H., Ververis, E., Voet, H. van der, Watzl, B., & Pires, S. M. (2022). Human health risk–benefit assessment of fish and other seafood: a scoping review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(27), 7479–7502. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1915240>

- Tian, L., & Bayen, S. (2018). Thermal degradation of chloramphenicol in model solutions, spiked tissues and incurred samples. *Food Chemistry*, 248, 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.043>
- Tolosa, J., Rodríguez-Carrasco, Y., Ruiz, M. J., & Vila-Donat, P. (2021). Multi-mycotoxin occurrence in feed, metabolism and carry-over to animal-derived food products: A review. *Food and Chemical Toxicology*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112661>
- Torre, R., Freitas, M., Costa-Rama, E., Nouws, H. P. A., & Delerue-Matos, C. (2022). Food allergen control: Tropomyosin analysis through electrochemical immunosensing. *Food Chemistry*, 396. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133659>
- Ulanova, T. S., Karnazhitskaya, T. D., Zelenkin, S. E., & Zorina, A. S. (2021). Phthalate analysis in foods for young children using LC-MS method. *Problems of Nutrition*, 90(2), 128–137. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-2-128-137>
- Upadhyay, M. K., Shukla, A., Yadav, P., & Srivastava, S. (2019). A review of arsenic in crops, vegetables, animals and food products. *Food Chemistry*, 276, 608–618. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.069>
- Van der Fels-Klerx, H. J., Van Asselt, E. D., Raley, M., Poulsen, M., Korsgaard, H., Bredsdorff, L., Nauta, M., D'agostino, M., Coles, D., Marvin, H. J. P., & Frewer, L. J. (2018). Critical review of methods for risk ranking of food-related hazards, based on risks for human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(2), 178–193. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1141165>
- Vidaček, S. (2013). Seafood. In *Food safety management: A practical guide for the food industry* (pp. 189–212). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381504-0.00008-1>
- Vitali, C., Peters, R. J. B., Janssen, H. G., & Nielen, M. W. F. (2023). Microplastics and nanoplastics in food, water, and beverages; part I. occurrence. *TrAC — Trends in Analytical Chemistry*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116670>
- Vitali, C., Peters, R. J. B., Janssen, H.-G., Nielen, M. W. F., & Ruggeri, F. S. (2022). Microplastics and nanoplastics in food, water, and beverages, part II. Methods. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 157, 116819. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116819>
- Wang, R., Sang, P., Guo, Y., Jin, P., Cheng, Y., Yu, H., Xie, Y., Yao, W., & Qian, H. (2023). Cadmium in food: Source, distribution and removal. *Food Chemistry*, 405, 134666. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134666>
- Wen, A., Yuan, S., Wang, H., Mi, S., Yu, H., Guo, Y., Xie, Y., Qian, H., & Yao, W. (2024). Molecular insights on the binding of chlortetracycline to bovine casein and its effect on the thermostability of chlortetracycline. *Food Chemistry*, 432, 137104. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137104>
- Xia, H., Zhang, H., Zhu, Z., Tong, K. xuan, Chang, Q., Zhang, H., Fan, C., & Chen, H. (2024). Rapid determination of eight biogenic amines in air-dried yak meat by QuEChERS combined with ultra-performance liquid chromatography-mass spectrometry. *Journal of Food Composition and Analysis*, 133, 106466. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106466>
- Xu, X., Liu, X., Zhang, J., Liang, L., Wen, C., Li, Y., Shen, M., Wu, Y., He, X., Liu, G., & Xu, X. (2023). Formation, migration, derivation, and generation mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons during frying. *Food Chemistry*, 425, 136485. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136485>
- Zhang, J., Chen, R., Zhou, H., Wen, D., Lu, Q., Xiong, J., & Wang, C. (2024). Prevalence of aflatoxin B1 in four kinds of fermented soybean-related products used as traditional Chinese food. *LWT*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115611>
- Zhang, Y., Zhang, Y., Jia, J., Peng, H., Qian, Q., Pan, Z., & Liu, D. (2023). Nitrite and nitrate in meat processing: Functions and alternatives. *Current Research in Food Science*, 6, 100470. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100470>
- Zhang, Z., Zhang, H., Tian, D., Phan, A., Seididamyeh, M., Alanazi, M., Ping Xu, Z., Sultanbawa, Y., & Zhang, R. (2024). Luminescent sensors for residual antibiotics detection in food: Recent advances and perspectives. *Coordination Chemistry Reviews*, 498, 215455. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215455>
- Zhao, L., Szakas, T., Churley, M., & Lucas, D. (2019). Multi-class multi-residue analysis of pesticides in edible oils by gas chromatography-tandem mass spectrometry using liquid-liquid extraction and enhanced matrix removal lipid cartridge cleanup. *Journal of Chromatography A*, 1584, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.11.022>
- Zurier, H. S., & Goddard, J. M. (2021). Biodegradation of microplastics in food and agriculture. *Current Opinion in Food Science*, 37, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.09.001>

ОБ АВТОРАХ

Лаврухина Ольга Игоревна, к.х.н, доцент, ведущий научный сотрудник отдела научного планирования и НИР ФГБУ «Всероссийский государственный центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов» (123022, Российская Федерация, г. Москва, Звенигородское ш., д. 5), доцент кафедры химии ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых» (600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, д. 87), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6248-5726>, Scopus ID: 58625847600, SPIN-код: 6238-3898, e-mail: hamsster@mail.ru

Макаров Дмитрий Алексеевич, старший научный сотрудник отдела безопасности пищевой и кормовой продукции ФГБУ «Всероссийский государственный центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов» (123022, Российская Федерация, г. Москва, Звенигородское ш., д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3834-0695>, Scopus ID: 57125646200, SPIN-код: 7545-8829, e-mail: phorez@yandex.ru

Козеичева Елизавета Сергеевна, к.б.н, ведущий научный сотрудник отдела безопасности пищевой и кормовой продукции ФГБУ «Всероссийский государственный центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов» (123022, Российская Федерация, г. Москва, Звенигородское ш., д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6609-8256>, Scopus ID: 57418694300, SPIN-код: 1545-3797, e-mail: e.kozeicheva@vgnki.ru

Балагула Татьяна Викторовна, к.вет.н., начальник управления государственного ветеринарного надзора Федеральной службы по ветеринарному и фитосанитарному надзору (107996, Российская Федерация, г. Москва, Орликов пер., д. 1/11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0583-4277>, e-mail: t.balagula2011@yandex.ru

Третьяков Алексей Викторович, к.х.н., доцент, заместитель директора ФГБУ «Всероссийский государственный центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов» (123022, Российская Федерация, г. Москва, Звенигородское ш., д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4984-9502>, Scopus ID: 36151319600, SPIN-код: 2054-9696, e-mail: a.tretyakov@vgnki.ru

Гергель Мария Александровна, к.б.н., заведующий отделением биотехнологии ФГБУ «Всероссийский государственный центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов» (123022, Российская Федерация, г. Москва, Звенигородское ш., д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8033-1154>, Scopus ID: 57219603683, SPIN-код: 1281-8573, e-mail: m.gergel@vgnki.ru

Лозовая Евгения Александровна, начальник службы качества ФГБУ «Всероссийский государственный центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов» (123022, Российская Федерация, г. Москва, Звенигородское ш., д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8557-0607>, e-mail: lozovaya@vgnki.ru

AUTHOR INFORMATION

Lavrukhina Olga Igorevna, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Leading Research Scientist, Department of Scientific Planning and Research, The Russian State Center for Animal Feed and Drug Standardization and Quality (123022, Russian Federation, Moscow, Zvenigorodskoe shosse, 5); Associate Professor, Department of Chemistry, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs" (600000, Russian Federation, Vladimir, ul. Gorkogo, 87). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6248-5726>, Scopus ID: 58625847600, SPIN-code: 6238-3898, e-mail: hamsster@mail.ru

Makarov Dmitry Alexeyevich, Senior Research Scientist, Department of Food and Feed Safety, The Russian State Center for Animal Feed and Drug Standardization and Quality (123022, Russian Federation, Moscow, Zvenigorodskoe shosse, 5). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3834-0695>, Scopus ID: 57125646200, SPIN-code: 7545-8829, e-mail: phorez@yandex.ru

Kozeicheva Elizaveta Sergeevna, Cand. Sci. (Biol.), Leading Research Scientist, Department of Food and Feed Safety, The Russian State Center for Animal Feed and Drug Standardization and Quality (123022, Russian Federation, Moscow, Zvenigorodskoe shosse, 5). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6609-8256>, Scopus ID: 57418694300, SPIN-code: 1545-3797, e-mail: e.kozeicheva@vgnki.ru

Balagula Tatiana Victorovna, Cand. Sci. (Vet.), Head of the State Veterinary Supervision Department, Federal Service for Veterinary and Phytosanitary Surveillance (107996, Russian Federation, Moscow, Orlikov per., 1/11). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0583-4277>, e-mail: t.balagula2011@yandex.ru

Tretyakov Alexey Victorovich, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Deputy Director, The Russian State Center for Animal Feed and Drug Standardization and Quality (123022, Russian Federation, Moscow, Zvenigorodskoe shosse, 5). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4984-9502>, Scopus ID: 36151319600, SPIN-code: 2054-9696, e-mail: a.tretyakov@vgnki.ru

Gergel Maria Alexandrovna, Cand. Sci. (Biol.), Head of the Biotechnology Department, The Russian State Center for Animal Feed and Drug Standardization and Quality (123022, Russian Federation, Moscow, Zvenigorodskoe shosse, 5). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8033-1154>, Scopus ID: 57219603683, SPIN-code: 1281-8573, e-mail: m.gergel@vgnki.ru

Lozovaya Evgeniya Alexandrovna, Head of the Quality Service, The Russian State Center for Animal Feed and Drug Standardization and Quality (123022, Russian Federation, Moscow, Zvenigorodskoe shosse, 5). ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8557-0607>, e-mail: lozovaya@vgnki.ru

Механизмы усиления синтеза бактериоцинов представителями семейства *Lactobacillaceae*: обзор предметного поля

И.Р. Соколов, В.М. Нсанова, В.М. Виноградов, М.С. Каночкина

Российский биотехнологический университет, г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Актуальность: Бактериоцины молочнокислых бактерий представляют собой рибосомально синтезируемые антимикробные пептиды, обладающие активностью в отношении широкого спектра патогенных и антибиотикорезистентных микроорганизмов. Их применение в пищевой, медицинской и биотехнологической отраслях обуславливает потребность в стабильной и высокоэффективной продукции. Повышение синтетической активности штаммов-продуцентов остаётся ключевым условием расширения промышленного использования бактериоцинов.

Цель: Систематизировать и сопоставить современные стратегии повышения синтеза бактериоцинов у представителей семейства *Lactobacillaceae*, с учётом биохимических, технологических и молекулярно-генетических факторов.

Материалы и методы: Выполнен систематический обзор литературы 2010–2025 гг. с использованием PRISMA-протокола. Отобраны 71 публикация, из которых 62 статьи соответствовали критериям включения. Поиск осуществлялся в Pubmed и Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) с применением поэтапной оценки релевантности источников.

Результаты: Обобщены данные о влиянии условий культивирования (pH, температура, состав среды, углеродно-азотное питание), применении ко-культур и индукторов кворум-сенсинга (PlnA, AI-2), а также о генно-инженерных подходах на основе регулируемой экспрессии и системы CRISPR-Cas9. Показано, что наиболее перспективным направлением интенсификации бактериоциногенеза у *L. plantarum* является ко-культивирование с *B. subtilis* и использование лактозосодержащих сред. Гетерологичная экспрессия пептидов PlnJ и PlnK на основе низин-индуцибельных систем позволяет получать активные формы с выраженной антимикробной активностью. Несмотря на высокий потенциал генно-инженерных решений, отмечается необходимость их стандартизации для широкого применения.

Выводы: Комбинированный подход, включающий оптимизацию условий среды, направленную индукцию и современные методы генной инженерии, обеспечивает значительное увеличение продукции бактериоцинов. Рациональный выбор стратегии с учётом специфики штамма и производственного контекста открывает возможности масштабирования биосинтеза без существенного роста затрат.

Ключевые слова: бактериоцины; молочнокислые бактерии; *Lactobacillaceae*; плантарицин; низин; CRISPR-Cas9; питательная среда; биотехнология

Корреспонденция:

М.С. Каночкина

E-mail: kanoch@yandex.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 10.02.2025

Принята: 15.06.2025

Опубликована: 30.06.2025

Copyright: © 2025 Авторы



Для цитирования: Соколов, И.Р., Нсанова, В.М., Виноградов, В.М., & Каночкина, М.С. (2025). Механизмы усиления синтеза бактериоцинов представителями семейства *Lactobacillaceae*. *FOOD METAENGINEERING*, 3(2), 106–132. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.81>

Mechanisms of Enhancing Bacteriocin Synthesis by Members of the *Lactobacillaceae*: A Scoping Review

Ilya R. Sokolov, Viktoria M. Nsanova, Maksim V. Vinogradov, Maria S. Kanochkina

Russian Biotechnological University,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Background: Bacteriocins produced by lactic acid bacteria are ribosomally synthesized antimicrobial peptides effective against a wide range of pathogenic and antibiotic-resistant microorganisms. Their growing use in food, medical, and biotechnological applications drives the demand for stable and highly efficient production. Enhancing the biosynthetic activity of producer strains remains a critical factor for expanding the industrial use of bacteriocins.

Purpose: To systematize and compare current strategies aimed at enhancing bacteriocin synthesis in members of the *Lactobacillaceae* family, with a focus on biochemical, technological, and molecular-genetic factors.

Materials and Methods: A systematic literature review was conducted following the PRISMA protocol, covering publications from 2010 to 2025. A total of 71 sources were identified, of which 62 met the inclusion criteria. The search was carried out in PubMed and the Russian Science Citation Index (RSCI) using a multi-stage relevance screening procedure.

Results: The review summarizes data on how cultivation conditions (pH, temperature, medium composition, carbon–nitrogen sources), co-culture methods, and quorum-sensing inducers (e.g., PlnA, AI-2) affect bacteriocin production. It also addresses genetic engineering approaches involving inducible expression systems and CRISPR-Cas9 technologies. Among the most promising strategies for enhancing bacteriocinogenesis in *L. plantarum* are co-cultivation with *B. subtilis* and the use of lactose-based media. Heterologous expression of PlnJ and PlnK peptides using nisin-inducible systems has yielded active forms with strong antimicrobial activity. Despite the high potential of genetic engineering, there remains a need for standardization to enable widespread industrial implementation.

Conclusion: A combined approach (optimizing culture conditions, targeted induction, and advanced genetic engineering) can significantly boost bacteriocin yield. The rational selection of a production strategy tailored to the specific strain and industrial context offers a pathway to scalable biosynthesis without substantially increasing costs.

Keywords: bacteriocins; lactic acid bacteria; *Lactobacillaceae*; plantaricin; nisin; CRISPR-Cas9; culture medium; biotechnology

Correspondence:

Maria S. Kanochkina

E-mail: kanoch@yandex.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 10.02.2025

Accepted: 15.06.2025

Published: 30.06.2025

Copyright: © 2025 The Authors



To cite: Sokolov, I.R., Nsanova, V.M., Vinogradov, V.M., & Kanochkina, M.S. (2025). Mechanisms of enhancing bacteriocin synthesis by members of the *Lactobacillaceae*. *FOOD METAENGINEERING*, 3(2), 106–132. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.81>

ВВЕДЕНИЕ

Бактериоцины представляют собой антимикробные пептиды и белки рибосомного происхождения, обладающие высокой специфичностью действия и способностью избирательно подавлять рост филогенетически близких микроорганизмов. Будучи результатом эволюционного механизма межмикробной конкуренции, они продемонстрировали значительный потенциал в области биотехнологии, медицины и пищевой промышленности, особенно в условиях глобального распространения антибиотикорезистентности (Holzapfel & Wood, 2018; Savadogo, 2019).

Молочнокислые бактерии (МКБ), в частности представители родов *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Pediococcus* и *Enterococcus*, активно исследуются как основные продуценты бактериоцинов. Их метаболиты, включая низин, педиоцин, плантарицин и лактоцин, проявляют высокую активность в отношении *Listeria monocytogenes* и других патогенных микроорганизмов, представляющих угрозу пищевой и клинической безопасности (Егоров, 2020; Dobson et al., 2012). Обладая статусом GRAS, бактериоцины МКБ характеризуются высокой термостабильностью и биосовместимостью, что делает их особенно перспективными для включения в рецептуры функциональных пищевых продуктов и медицинских препаратов (Mozzi et al., 2020; Holzapfel & Wood, 2018).

Классификация бактериоцинов включает четыре основных класса, среди которых наибольший интерес представляют лантибиотики (класс I) и пептиды класса IIa, обладающие устойчивостью к широкому диапазону pH и высокой стабильностью в пищевых матрицах (Gharsallaoui et al., 2020). Механизмы их действия варьируются от нарушения целостности клеточных мембран до ингибирования синтеза нуклеиновых кислот и блокировки рибосомальных структур, что обуславливает широкий спектр антимикробной активности и снижает вероятность формирования устойчивости (Savadogo, 2019; Alvarez-Sieiro et al., 2016).

Несмотря на многочисленные публикации, посвященные антимикробным свойствам бактериоцинов и их применению в различных отраслях, остаётся недостаточно систематизированной информации о комплексных подходах к усилению их синтеза. На эффективность бактериоциногенеза влияют многочисленные биохимические, физиологические и технологические факторы: состав питательной среды (Paragianni et al., 2007),

уровень pH (Todorov et al., 2010), фаза роста культуры (Zamfir et al., 2000), источники углерода и азота (Cheigh et al., 2002; Miao et al., 2015), наличие стресс-индукторов (Ljungh & Wadstrom, 2021), а также межвидовые взаимодействия при совместном культивировании (Liu et al., 2022). Кроме того, быстро развивающиеся инструменты генной инженерии, включая систему CRISPR-Cas9, позволяют усиливать экспрессию целевых генов и повышать выход бактериоцинов за счёт точечной модификации регуляторных участков (Xu et al., 2019; Liu et al., 2022).

На сегодняшний день отсутствует единый обзор, интегрирующий различные подходы к интенсификации бактериоциногенеза на примере штаммов семейства *Lactobacillaceae*, что затрудняет выбор оптимальных стратегий для промышленной и прикладной биотехнологии.

Целью настоящего обзора является систематизация и сопоставление современных подходов к усилению синтеза бактериоцинов у представителей семейства *Lactobacillaceae* на основе биохимических, технологических и молекулярно-генетических факторов. В рамках обзора поставлены следующие исследовательские вопросы:

RQ1: Какие технологические и биохимические параметры среды (pH, температура, состав питательной среды, углеродно-азотные источники) способствуют повышению продуктивности бактериоциногенных штаммов семейства *Lactobacillaceae*?

RQ2: В какой мере применение ко-культивирования и химических индукторов (включая молекулы кворум-сенсинга) влияет на уровень синтеза бактериоцинов и экспрессию регуляторных генных кластеров?

RQ3: Какие генно-инженерные стратегии, в том числе системы на основе низина и CRISPR-Cas9, демонстрируют наибольшую эффективность при усилении бактериоциногенеза у штаммов молочнокислых бактерий?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Настоящая работа представляет собой обзор предметного поля, направленный на систематизацию существующих научных подходов к усилению синтеза бактериоцинов у представителей семейства *Lactobacillaceae*. Структура и логика обзора соответствуют рекомендациям PRISMA для систематического поиска, применя-

емого в исследованиях, охватывающих междисциплинарные и биотехнологические направления.

Источники и стратегия поиска

Поиск литературы осуществлялся в двух базах данных: eLibrary (РИНЦ) и PubMed. Стратегия поиска включала логические комбинации ключевых слов на русском и английском языках: «бактериоцины», «молочнокислые бактерии», «усиление синтеза», «низин», «плантарицин», «CRISPR-Cas9», «среда культивирования», «индуктор», а также их англоязычные эквиваленты: «bacteriocins», «lactic acid bacteria», «enhanced synthesis», «nisin», «plantaricin», «CRISPR-Cas9», «nutrient medium», «inducer». Поиск охватывал публикации, вышедшие с 2010 по 2025 год включительно.

Критерии включения

В обзор были включены публикации, соответствующие следующим критериям:

1. Оригинальные исследовательские, обзорные и методологические статьи.
2. Наличие эмпирических или обобщенных данных, касающихся механизмов повышения синтеза бактериоцинов.
3. Публикация в рецензируемом научном издании.
4. Соответствие предметному полю (биотехнология, микробиология, молекулярная генетика).
5. Географическая принадлежность авторов — любая.
6. Доступ к полному тексту статьи.

Критерии исключения

1. Без научной верификации (препринты без рецензии, блоги, веб-ресурсы);
2. Не содержащие данных по *Lactobacillaceae*;
3. Не имеющие описания условий усиления синтеза или молекулярных механизмов;
4. Не прошедшие полнотекстовую проверку на релевантность.

Процедура отбора

На этапе идентификации было выявлено 43 источника в eLibrary и 40 в PubMed ($n = 83$). После удаления дубликатов и сканирования аннотаций к дальнейшему анализу было отобрано 71 исследование. На основе полнотекстовой оценки были исключены 9 публикаций как

не соответствующие критериям включения. Финальный корпус включал 62 источника.

Обоснование включения источников вне временного интервала

Несмотря на установленный хронологический диапазон (2010–2025 гг.), в обзор были включены два источника, опубликованные ранее. Их использование обусловлено высокой теоретической значимостью и отсутствием современных альтернатив, раскрывающих соответствующие аспекты молекулярной регуляции бактериоциногенеза.

Табуляция данных

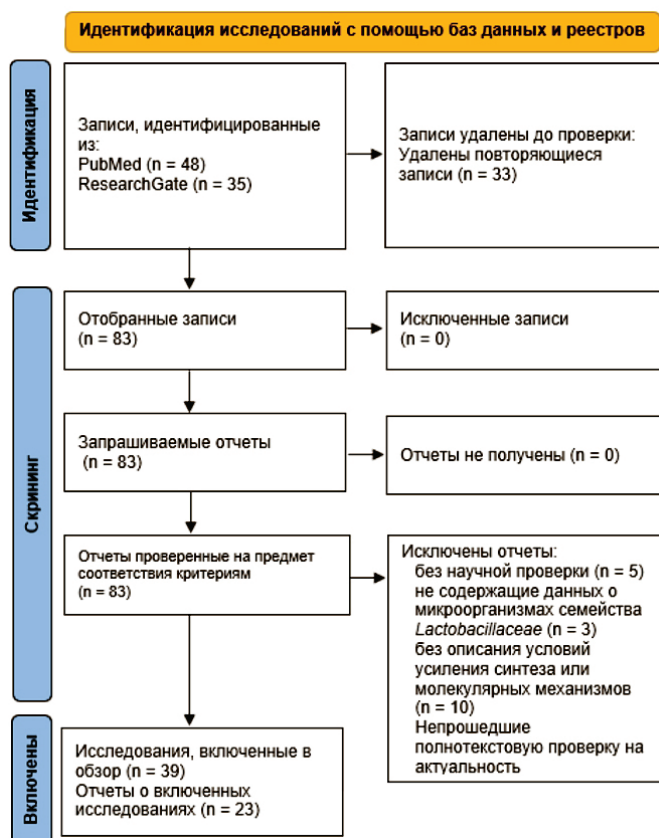
Для обеспечения прозрачности и структурированного анализа была проведена табуляция отобранных источников по ряду параметров, отражающих содержатель-

Рисунок 1

Диаграмма PRISMA

Figure 1

PRISMA Flow Diagram



ную направленность и методологическое качество исследований. Каждому источнику было присвоено уникальное идентификационное число, после чего статьи были классифицированы по следующим признакам:

1. Автор(ы) и год публикации — для отслеживания хронологического распределения и авторских школ.
2. Тип исследования — эмпирическое, теоретическое, обзорное, методологическое.
3. Объект исследования — конкретный штамм или группа бактерий семейства *Lactobacillaceae*.
4. Условия культивирования — параметры среды, pH, температура, источники углерода/азота.
5. Используемые подходы к усилению синтеза — ко-культивирование, добавление индукторов, генная инженерия и др.
6. Ключевые результаты — основные выводы об эффективности применённых методов.
7. Уровень экспериментальной верификации — *in vitro*, *in vivo*, моделирование, без верификации.

Результаты табуляции представлены в Приложении 1, отражающей как методологическое разнообразие исследований, так и доминирующие направления в области интенсификации бактериоциногенеза. Отдельно были помечены публикации, в которых применялись генно-инженерные методы, включая системы на основе *nisin-controlled expression* и CRISPR-Cas9. Табуляция позволила провести сопоставительный анализ источников, выявить наиболее часто применяемые биотехнологические стратегии, а также установить методологические пробелы, требующие дальнейшей проработки.

Анализ и систематизация данных

Анализ отобранных источников осуществлялся в несколько этапов с использованием тематического и сравнительного подходов. Исходя из цели обзора, все включённые исследования были сгруппированы по трём основным направлениям: (1) технологические условия культивирования, (2) биохимические и физиологические факторы, (3) молекулярно-генетические подходы к регуляции синтеза бактериоцинов.

На первом этапе проведено качественное кодирование данных с выделением повторяющихся экспериментальных параметров, таких как состав питательной среды, уровень pH, температурный режим, стадия роста культуры, а также присутствие ко-культивируемых штаммов

и добавок-индукторов (PlnA, Al-2). Эти параметры были далее агрегированы в обобщённые категории, что позволило оценить частоту использования конкретных методик и их документированную эффективность.

На втором этапе выполнена сравнительная систематизация биотехнологических решений, с опорой на степень экспериментальной верификации и масштабируемость. Было выделено несколько устойчивых моделей усиления синтеза, включая:

1. Использование лактозосодержащих и дрожжевых субстратов как оптимизаторов среды,
2. Ко-культивирование с *Bacillus subtilis* как способ стимуляции экспрессии кластеров *plnABCD*,
3. Применение гетерологичных систем экспрессии на основе низина и CRISPR-Cas9 для точечной регуляции синтеза PlnJ и PlnK.

Отдельно была проведена идентификация противоречивых данных и методологических пробелов. В частности, выявлены расхождения в оценке эффективности лактозы как углеродного источника и отсутствия единых критериев отбора индукторов кворум-сенсинга.

На заключительном этапе был сформирован обобщающий тематический профиль исследований, отражающий текущие тренды в области бактериоциногенеза у представителей *Lactobacillaceae*.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общая характеристика проанализированных публикаций

В анализ были включены 62 научные публикации, соответствующие критериям релевантности и охватывающие период с 2010 по 2024 гг. Большинство исследований (68 %) выполнены в лабораторных условиях *in vitro*, с оценкой синтеза бактериоцинов по индикаторным зонам ингибирования или единицам активности (АЕ/мл). Преобладающее число работ проведено в странах Восточной Азии (Китай, Южная Корея, Япония), а также в странах ЕС (Германия, Франция, Испания) (Рисунок 2). Наиболее часто исследуемыми микроорганизмами оказались штаммы *Lactiplantibacillus plantarum* (31 % включённых работ), *Lactococcus lactis* (18 %), *Enterococcus faecium* (11 %) и *Pediococcus acidilactici* (9 %).

Анализ включённых в обзор публикаций показал, что синтез бактериоцинов молочнокислыми бактерия-

Рисунок 2

Схема распределения литературных источников по странам

Figure 2

Distribution of Literature Sources by Country



ми рассматривается в научной литературе как много-уровневый процесс, зависящий от совокупности биологических и технологических факторов. Регуляция продукции антимикробных пептидов осуществляется как на уровне внешней среды (состав питательных субстратов, pH, температура), так и за счёт клеточной экспрессии генных кластеров, межвидовых взаимодействий и молекулярных сигналов (например, индукторов кворум-сенсинга).

Содержательный анализ публикаций позволил классифицировать их по основным направлениям исследовательского фокуса:

1. Условия культивирования: наиболее представленной категорией оказались работы, направленные на оптимизацию среды роста: 25 исследований (40 %) анализируют влияние pH, температуры, состава углеродно-азотных источников и времен-

ных параметров инкубации на уровень синтеза бактериоцинов. В большинстве случаев изучаются штаммы *Lactobacillus plantarum*, *Lactococcus lactis* и *Pediococcus acidilactici*.

2. Ко-культивирование и стресс-факторы: вторую по численности группу составляют исследования, посвященные ко-культивированию с другими микроорганизмами и применению индуцирующих факторов ($n = 18, 29 \%$). Авторы этих работ оценивают влияние совместного метаболизма, индукторов кворум-сенсинга (PInA, AI-2), а также окислительно-го и температурного стресса на активацию генных кластеров.
3. Генно-инженерные подходы: 14 публикаций (23 %) ориентированы на использование методов синтетической биологии, включая экспрессию гетерологических конструкций на основе низина и приме-

И.Р. Соколов, В.М. Нсанова, В.М. Виноградов, М.С. Каночкина

нение систем CRISPR-Cas9 для усиления продукции плантарицинов (PlnJ, PlnK). Эти работы демонстрируют высокий потенциал для стандартизации бактериоциногенеза.

4. Обзорные и теоретические источники: оставшиеся 5 статей (8 %) имеют обобщающий характер и содержат концептуальный анализ регуляторных механизмов, структурной классификации бактериоцинов и перспектив биотехнологического применения молочнокислых бактерий.

Таким образом, совокупность источников охватывает весь спектр актуальных направлений в исследовании механизмов усиления бактериоциногенеза, отражая как фундаментальные аспекты биосинтеза, так и прикладные стратегии оптимизации производства.

Влияние технологических факторов на синтез бактериоцинов

На синтез бактериоцинов влияет множество технологических факторов, включая состав питательной среды, уровень pH, температуру и скорость роста микроорганизмов (De Arauz et al., 2009; Mataragas et al., 2002). В рамках подраздела проанализировано 25 работ, выделено 3 основных направления: влияние pH на синтез бактериоцинов, состава питательной среды и добавок в среду источников углерода и азота.

Влияние pH на синтез бактериоцинов МКБ

Кислотность среды требуют точной настройки. Оптимальный уровень pH процесса культивирования для максимального синтеза бактериоцинов представителями МКБ находится в пределах 3.5÷6.5 ед., поскольку чрезмерная кислотность тормозит рост культуры (Таблица 1) (Stiles & Holzapfel, 2022, Todorov et al., 2010). В таблицу включены данные исследований, в которых количественно оценивалось влияние pH на антимикробную активность нейтрализованного бесклеточного экстракта бактериоциногенных штаммов МКБ в контролируемых условиях *in vitro*.

Необходимо отметить, что при pH 9.0÷11.0 активность снижается вдвое, что указывает на чувствительность к щелочной среде. В диапазоне pH 2.0÷8.0 ед. активность стабильна: 320 AE/см³ у *L. mesenteroides* и 160 AE/см³ у *L. curvatus*. При этом в исследованиях (Todorov et al., 2010) зафиксировано, что максимальная продукция бактериоцинов у *L. plantarum* достигается при стабили-

Таблица 1

Уровень pH влияющий на антимикробную активность нейтрализованного бесклеточного экстракта бактериоциногенных штаммов видов *Lactobacillus curvatus* и *Leuconostoc mesenteroides*

Table 1

pH Level Affecting the Antimicrobial Activity of the Neutralized Cell-Free Extract of Bacteriocinogenic Strains of *Lactobacillus curvatus* and *Leuconostoc mesenteroides*

Условия	Антимикробная активность нейтрализованного бесклеточного экстракта штамма, AE/ см ³	
	<i>L. mesenteroides</i> L124	<i>L. curvatus</i> L442
pH, ед.		
2.0	320	160
3.0	320	160
4.0	320	160
5.0	320	160
6.0	320	160
7.0	320	160
8.0	320	160
9.0	160	80
10.0	160	80
11.0	160	80

Примечание. Составлено по Todorov et al. (2010).

Note. Compiled according to Todorov et al. (2010).

зации pH в диапазоне 3.5÷6.5 ед., с пиковым значением в значении 3.8 ед. pH.

Влияние питательной среды на синтез бактериоцинов

Питательная среда оказывает непосредственное влияние на синтез целевых соединений. Наиболее часто для культивирования бактерий, продуцирующих бактериоцины, используется питательная среда MRS, поскольку она полноценно удовлетворяет потребности МКБ и является стандартной средой для культивирования. Однако необходимость увеличения выхода целевого продукта, высокая стоимость среды и наличие большого количества белков, затрудняющих очистку целевого продукта, побуждают исследователей искать альтернативные среды. В этом направлении показали эффективность такие среды, как:

- (1) TGE. Среда подходит для культивирования молочнокислых бактерий и тестовых штаммов патогенных микроорганизмов для анализов антимикробной активности МКБ. Состав: триптон — 5,0÷10,0 г/л;

- глюкоза — 1,0÷5,0 г/л; дрожжевой экстракт — 1,0÷3,0 г/л; мясной экстракт — 3,0 г/л; агар — 15,0÷18,0 г/л (Xu et al., 2019),
- (2) M17. На данной среде самые лучшие результаты роста показывают представители родов *Lactococcus* и *Streptococcus*. Состав: триптон — 5,0 г/л; соевый пептон — 5,0 г/л; дрожжевой экстракт — 2,5 г/л; лактоза — 5,0 г/л; аскорбиновая кислота — 0,5 г/л; сульфат магния — 0,25 г/л; агар — 10÷11 г/л (Cheigh et al., 2002)
- (3) АРТ. Универсальная питательная среда для культивирования гетероферментативных молочнокислых бактерий таких как *Lactobacillus* и *Leuconostoc*, требующих тиамин. Состав: триптон — 5,0 г/л; дрожжевой экстракт — 5 г/л; Tween 80—1,0 г/л; сульфат магния — 0,2 г/л; сульфат железа — 0,01 г/л; хлорид марганца — 0,05 г/л; цитрат натрия — 5,0 г/л; агар — 15,0 г/л (Cheigh et al. 2002)
- (4) Elliker. Селективная питательная среда, разработанная специально для культивирования молочнокислых бактерий. Состав: триптон — 20,0 г/л; дрожжевой экстракт — 5 г/л; лактоза — 5,0 г/л; глюкоза — 5,0 г/л; сахароза — 5,0 г/л; аскорбиновая кислота — 0,5 г/л; цитрат натрия — 2,0 г/л; ацетат натрия — 1,5 г/л; агар — 15,0 г/л (Cheigh et al., 2002).

Представленные данные свидетельствуют о возможности оптимизации культуры с помощью подбора подходящей среды. Таким образом, от подбора компонентов среды зависят не только продуктивность штаммов-продуцентов, но и стабильность синтеза, качество конечного продукта и экономическая целесообразность производства. В этой связи достижение более сбалансированного содержания углеводов, азота и микроэлементов может создать условия для стабильного роста культуры и усиления метаболической активности.

Влияние добавок в среду источников углерода и азота на синтез бактериоцинов

Оптимизация состава питательной среды остается одним из основных направлений повышения эффективности биосинтеза бактериоцинов. Глюкоза и лактоза служат основными источниками энергии, а пептоны и дрожжевой экстракт обеспечивают аминокислотный и витаминный фон. Необходимыми компонентами среды также являются ионы магния, марганца и железа, которые участвуют в ферментативных реакциях и поддерживают клеточный метаболизм.

В ряде случаев требуется обогащение среды углеводами для обеспечения роста конкретных штаммов. В Таблицу 2 включены данные исследований, в которых количественно оценивалось влияние различных углеводов на синтез бактериоцинов МКБ в контролируемых условиях *in vitro*, при этом исследования с верифицированным измерением активности (АЕ/см³ и в мм зоны задержки роста контрольных условно-патогенных штаммов).

Наиболее часто используются глюкоза, лактоза, сахароза, фруктоза, мальтоза, манноза и другие сахара (Cheigh et al., 2002; Miao et al., 2015; Settanni et al., 2008). Добавление глюкозы, по данным нескольких исследований, способствует росту клеток и активному синтезу бактериоцинов, причем не только на стандартизованных средах, но и при синтезе в стерилизованном молоке (Luesink et al., 1998; Papagianni et al., 2007; Miao et al., 2015). Аналогичный эффект показала и лактоза, особенно при производстве нисиноподобных бактериоцинов у *L. lactis* и *B. licheniformis* (Cheigh et al., 2002; Anthony et al., 2009).

Систематизированные данные показывают, что продукция бактериоцинов зависит от типа и концентрации углевода. Наиболее эффективно стимулируют синтез лактоза и манноза, тогда как рибоза, ксилоза и D-маннитол часто не усиливают продукцию. Представители *E. faecium* достигают максимального уровня (51200 АЕ/см³) при добавлении лактозы (10÷30 г/л) или маннозы (20 г/л), у *E. mundtii* высокая продукция наблюдается при добавлении лактозы, маннозы и Na-глюконата, при полном отсутствии активности на ксилозе и рибозе, у *L. lactis* максимальный выход низина фиксируется при 10 г/л глюкозы, при превышении этой концентрации активность резко падает. Наиболее стабильный и универсальный углевод — лактоза.

Не менее важную роль играют источники азота. Ограниченность аминокислот и пептидов в среде может тормозить рост клеток и, соответственно, снижать уровень продукции бактериоцинов (Aasen et al., 2000; Cheigh et al., 2002; Anthony et al., 2009). Некоторые пептиды также могут служить индукторами, запускающими синтез бактериоцинов, поэтому качественный источник азота должен содержать разнообразные соединения этого класса (Guerra и Pastrana, 2001; Parente & Hill, 1992; Vignolo et al., 1995). Одним из наиболее эффективных азотных компонентов считается дрожжевой экстракт, содержащий широкий спектр аминокислот и пептидов (Abo-Amer, 2011; Pattnaik, 2001). Хорошие

И.П. Соколов, В.М. Нсанова, В.М. Виноградов, М.С. Каночкина

Таблица 2

Влияние добавления различных углеводов на продукцию бактериоцинов молочнокислыми бактериями

Table 2

Effect of Adding Various Carbohydrates on Bacteriocin Production by Lactic Acid Bacteria

Штамм-продуцент	Бактериоцин	Основная среда	Источник углерода	Концентрация	Продукция/ активность бактериоцина	Ссылка
<i>L. paracasei subsp. tolerans</i> FX-6	Не указан	Стерилизованное молоко	Лактоза	2 (вес/ объем)	20 мм	Miao et al., 2015
			Глюкоза	2 %	22 мм	
			Мальтоза	2 %	22 мм	
			Сахароза	2 %	20 мм	
			Глюкоза	1–5 %	до 23,5 мм (макс. при 3%)	
<i>L. lactis subsp. lactis</i> A164	Подобный низину	M17 бульон	Глюкоза	0,5 %	2048 АЕ/ см ³	Cheigh et al., 2002
			Лактоза		16384 АЕ/ см ³	
			Сахароза		2048 АЕ/ см ³	
			Ксилоза		2048 АЕ/ см ³	
			Фруктоза		512 АЕ/ см ³	
			Мальтоза		4096 АЕ/ см ³	
			Галактоза		2048 АЕ/ см ³	
			Арабиноза		1024 АЕ/ см ³	
<i>E. mundtii</i> WGWT1–1A	Не указан	MRS	Фруктоза	20 г/л	640 АЕ/ см ³	Settanni et al., 2008
			Глюкоза		320 АЕ/ см ³	
			Лактоза		640 АЕ/ см ³	
			Сахароза		320 АЕ/ см ³	
			Рибоза		0 АЕ/ см ³	
			Na-глюконат		320 АЕ/ см ³	
			Манноза		640 АЕ/ см ³	
			Ксилоза		0 АЕ/ см ³	
<i>E. mundtii</i> GWG11.2	Не указан	MRS	Фруктоза	20 г/л	2560 АЕ/ см ³	Settanni et al., 2008
			Лактоза		2560 АЕ/ см ³	
			Мальтоза		2560 АЕ/ см ³	
			Сахароза		320 АЕ/ см ³	
			Рибоза		0 АЕ/ см ³	
			Na-глюконат		1280 АЕ/ см ³	
			Манноза		2560 АЕ/ см ³	
			Ксилоза		0 АЕ/ см ³	
<i>E. mundtii</i> WGJ20.1	Не указан	MRS	Фруктоза	20 г/л	1280 АЕ/ см ³	Settanni et al., 2008
			Лактоза		2560 АЕ/ см ³	
			Мальтоза		1280 АЕ/ см ³	
			Сахароза		640 АЕ/ см ³	
			Рибоза		0 АЕ/ см ³	
			Na-глюконат		1280 АЕ/ см ³	
			Манноза		2560 АЕ/ см ³	
			Ксилоза		0 АЕ/ см ³	

Продолжение Таблицы 2

Штамм-продуцент	Бактериоцин	Основная среда	Источник углерода	Концентрация	Продукция/ активность бактериоцина	Ссылка
<i>E. mundtii</i> WGJ40.2	Не указан	MRS	Фруктоза	20 г/л	5120 АЕ/ см ³	Settanni et al., 2008
			Лактоза		10240 АЕ/ см ³	
			Мальтоза		5120 АЕ/ см ³	
			Сахароза		2560 АЕ/ см ³	
			Рибоза		1280 АЕ/ см ³	
			На-глюконат		10240 АЕ/ см ³	
			Манноза		10240 АЕ/ см ³	
			Ксилоза		0 АЕ/ см ³	
<i>E. mundtii</i> WGK53	Не указан	MRS	Фруктоза	20 г/л	2560 АЕ/ см ³	Settanni et al., 2008
			Лактоза		5120 АЕ/ см ³	
			Мальтоза		2560 АЕ/ см ³	
			Сахароза		1280 АЕ/ см ³	
			Рибоза		0 АЕ/ см ³	
			На-глюконат		5120 АЕ/ см ³	
			Манноза		5120 АЕ/ см ³	
			Ксилоза		0 АЕ/ см ³	
<i>L. lactis subsp. lactis</i> ATCC 11454	Низин А	MCD среда	Глюкоза	2,5 г/л	830 АЕ/ см ³	Papagianni et al., 2007
				5 г/л	950 АЕ/ см ³	
				10 г/л	6100 АЕ/ см ³	
				25 г/л	5000 АЕ/ см ³	
				35 г/л	3100 АЕ/ см ³	
				50 г/л	2500 АЕ/ см ³	
				75 г/л	450 АЕ/ см ³	
<i>E. faecium</i> SD1	Enterocin SD1	Модифицированная MRS	Глюкоза	5 г/л	12800 АЕ/ см ³	Schirru et al., 2014
			Глюкоза	10 г/л	12800 АЕ/ см ³	
			Глюкоза	30 г/л	25600 АЕ/ см ³	
			Глюкоза	50 г/л	1600 АЕ/ см ³	
			Лактоза	5 г/л	25600 АЕ/ см ³	
			Лактоза	10 г/л	51200 АЕ/ см ³	
			Лактоза	20 г/л	25600 АЕ/ см ³	
			Лактоза	30 г/л	12800 АЕ/ см ³	
			Лактоза	50 г/л	6400 АЕ/ см ³	
			D-маннитол	20 г/л	0 АЕ/ см ³	
			Манноза	20 г/л	25600 АЕ/ см ³	
			Рамноза	20 г/л	0 АЕ/ см ³	
<i>E. faecium</i> SD2	Enterocin SD2	Модифицированная MRS	Глюкоза	5 г/л	3200 АЕ/ см ³	Schirru et al. 2014
			Глюкоза	10 г/л	6400 АЕ/ см ³	
			Глюкоза	30 г/л	6400 АЕ/ см ³	
			Глюкоза	50 г/л	800 АЕ/ см ³	
			Лактоза	5 г/л	51200 АЕ/ см ³	
			Лактоза	10 г/л	51200 АЕ/ см ³	
			Лактоза	20 г/л	51200 АЕ/ см ³	
			Лактоза	30 г/л	51200 АЕ/ см ³	
			Лактоза	50 г/л	25600 АЕ/ см ³	
			D-маннитол	20 г/л	0 АЕ/ см ³	
			Манноза	20 г/л	51200 АЕ/ см ³	
			Рамноза	20 г/л	6400 АЕ/ см ³	

Окончание Таблицы 2

Штамм-продуцент	Бактериоцин	Основная среда	Источник углерода	Концентрация	Продукция/ активность бактериоцина	Ссылка
<i>E. faecium</i> SD3	Enterocin SD3	Модифицированный MRS-бульон	Глюкоза	5 г/л	200 AE/ см ³	Schirru et al. 2014
			Глюкоза	10 г/л	200 AE/ см ³	
			Глюкоза	30 г/л	400 AE/ см ³	
			Глюкоза	50 г/л	200 AE/ см ³	
			Лактоза	5 г/л	800 AE/ см ³	
			Лактоза	10 г/л	3200 AE/ см ³	
			Лактоза	20 г/л	1600 AE/ см ³	
			Лактоза	30 г/л	400 AE/ см ³	
			Лактоза	50 г/л	200 AE/ см ³	
			D-маннитол	20 г/л	0 AE/ см ³	
			Манноза	20 г/л	1600 AE/ см ³	
<i>E. faecium</i> SD4	Enterocin SD4	Модифицированный MRS-бульон	Рамноза	20 г/л	0 AE/ см ³	Schirru et al. 2014
			Глюкоза	5 г/л	200 AE/ см ³	
			Глюкоза	10 г/л	200 AE/ см ³	
			Глюкоза	30 г/л	200 AE/ см ³	
			Глюкоза	50 г/л	0 AE/ см ³	
			Лактоза	5 г/л	400 AE/ см ³	
			Лактоза	10 г/л	400 AE/ см ³	
			Лактоза	20 г/л	200 AE/ см ³	
			Лактоза	30 г/л	200 AE/ см ³	
			Лактоза	50 г/л	200 AE/ см ³	
			D-маннит	20 г/л	0 AE/ см ³	
			Манноза	20 г/л	800 AE/ см ³	
			Рамноза	20 г/л	0 AE/ см ³	

Примечание. Составлено по Sidooski et al. (2019).

Note. Compiled according to Sidooski et al. (2019).

результаты также получены при использовании триптона — как при выращивании *L. lactis* subsp. *lactis* A164, так и при производстве энтероцинов SD1–SD4 (Cheigh et al., 2002; Schirru et al., 2014).

В Таблица 3 показано влияние различных источников азота на синтез бактериоцинов представителями МКБ. Таблица создана на базе исследований, в которых количественно оценивалось влияние различных углеводов на синтез бактериоцинов МКБ в контролируемых условиях *in vitro*, и включает только исследования с верифицированным измерением активности (AE/см³ и мм зоны задержки роста контрольных условно-патогенных штаммов бактерий).

Проанализированные исследования свидетельствуют, что наиболее эффективны компонентами питательных сред является дрожжевой экстракт, триптон и их комбинации, дополнительно было показано, что комбинация нескольких источников азота зачастую способствует

более высокой продукции, чем использование одного компонента (De Carvalho et al., 2009; Schirru et al., 2014): у *L. lactis* максимум (32768 AE/см³) достигается при добавлении 3 % экстракта дрожжей, у *S. bovis* наибольшая активность (9310 AE/см³·мг⁻¹) наблюдается при сочетании триптиказа и дрожжевого экстракта, у *L. acidophilus* высокие значения достигаются при использовании дрожжевого экстракта (12000 AE/см³) и триптона (7500 AE/см³), *E. faecium* показывает стабильную продукцию (25600 AE/см³) как при использовании одного триптона, так и при смешивании с мясным и дрожжевым экстрактами, у *E. faecium* аналогичный результат достигается только при тройной комбинации. В зависимости от задкйствованных при синтезе бактериоцинов метаболических путей у конкретного штамма может также не наблюдаться зависимости от днного вида добавок — штаммы *E. faecium* SD3 и SD4 проявляют низкую продукцию независимо от условий.

И.П. Соколов, В.М. Нсанова, В.М. Виноградов, М.С. Каночкина

Таблица 3

Влияние добавления различных источников азота на продукцию бактериоцинов молочнокислыми бактериями

Table 3

Effect of Adding Various Nitrogen Sources on Bacteriocin Production by Lactic Acid Bacteria

Штамм-продуцент	Бактериоцин	Основная среда	Источник азота	Концентрация	Продукция бактериоцина	Источник
<i>L. paracasei subsp. tolerans</i> FX-6	Не указано	Стерилизованное молоко	Пептон	2 % (мас./об.)	22 мм*	(Miao et al. 2015)
			Мясной экстракт	2 % (мас./об.)	25 мм*	
			Дрожжевой порошок	2 % (мас./об.)	26 мм*	
			Рыбная мука	2 % (мас./об.)	25 мм*	
			Соевый белок	2 % (мас./об.)	23 мм*	
			Сульфат аммония	2 % (мас./об.)	19 мм*	
<i>L. lactis subsp. lactis</i> A164	Низин-подобный бактериоцин	Бульон M17	Дрожжевой порошок	1 %–5 % (мас./об.)	26 мм (максимум при 2%)*	(Cheigh et al. 2002)
			Базовая среда	1 %	32 AE/ см ³	
			Мясной экстракт		256 AE/ см ³	
			Триптон		8192 AE/ см ³	
			Соевый триптон		8192 AE/ см ³	
			Экстракт дрожжей		16384 AE/ см ³	
			Пептон		1024 AE/ см ³	
			Казитон		4096 AE/ см ³	
			Протеозный пептон		8192 AE/ см ³	
			Казеин		4096 AE/ см ³	
<i>S. bovis</i> HC5	Бовицин HC5	Базовая среда	Экстракт дрожжей	1.5 г · л ⁻¹	2909 AE/ см ³ мг сухой массы	(De Carvalho et al. 2009)
			Триптиказ	1.5 г · л ⁻¹	1347 AE/ см ³ мг ⁻¹ сухой массы	
			Соевый пептон	1.5 г · л ⁻¹	552 AE/ см ³ мг ⁻¹ сухой массы	
			Мясной пептон	1.5 г · л ⁻¹	1230 AE/ см ³ мг ⁻¹ сухой массы	
			Казеиновый пептон	1.5 г · л ⁻¹	388 AE/ см ³ мг ⁻¹ сухой массы	
			Сульфат аммония	1.5 г · л ⁻¹	0 AE/ см ³ мг ⁻¹ сухой массы	
			Триптиказ + экстракт дрожжей	1.0 + 0.5 г · л ⁻¹	9310 AE/ см ³ мг ⁻¹ сухой массы	
<i>L. acidophilus</i> AA11	Не указано	Базовая среда	Мясной экстракт	1 %	200 AE/ см ³	(Abo-Amer 2011)
			Экстракт дрожжей		12000 AE/ см ³	
			Триптон		7500 AE/ см ³	
			Пептон		1500 AE/ см ³	
			Протеозный пептон		5200 AE/ см ³	
			Казитон		3000 AE/ см ³	
			Казеин		400 AE/ см ³	
			Соевый триптон		1000 AE/ см ³	

Окончание Таблицы 3

Штамм-продуцент	Бактериоцин	Основная среда	Источник азота	Концентрация	Продукция бактериоцина	Источник
<i>E. faecium</i> SD1	Энтеро-цин SD1	Модифи-цированный MRS-бульон	Триптон	20 г·л ⁻¹	25600 AE/ см ³	(Schirru et al. 2014)
			Мясной экстракт	20 г·л ⁻¹	6400 AE/ см ³	
			Экстракт дрожжей	20 г·л ⁻¹	200 AE/ см ³	
			Триптон + мясной экстракт	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	12800 AE/ см ³	
			Триптон + экстракт дрожжей	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	6400 AE/ см ³	
			Мясной экстракт + экстракт дрожжей	10 г·л ⁻¹ + 10 г·л ⁻¹	25600 AE/ см ³	
<i>E. faecium</i> SD2	Энтеро-цин SD2	Модифи-цированный MRS-бульон	Триптон	20 г·л ⁻¹	6400 AE/ см ³	(Schirru et al. 2014)
			Мясной экстракт	20 г·л ⁻¹	6400 AE/ см ³	
			Экстракт дрожжей	20 г·л ⁻¹	1600 AE/ см ³	
			Триптон + мясной экстракт	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	3200 AE/ см ³	
			Триптон + экстракт дрожжей	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	3200 AE/ см ³	
			Мясной экстракт + экстракт дрожжей	10 г·л ⁻¹ + 10 г·л ⁻¹	6400 AE/ см ³	
<i>E. faecium</i> SD3	Энтеро-цин SD3	Модифи-цированный MRS-бульон	Триптон	20 г·л ⁻¹	1600 AE/ см ³	(Schirru et al. 2014)
			Мясной экстракт	20 г·л ⁻¹	400 AE/ см ³	
			Экстракт дрожжей	20 г·л ⁻¹	400 AE/ см ³	
			Триптон + мясной экстракт	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	200 AE/ см ³	
			Триптон + экстракт дрожжей	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	200 AE/ см ³	
			Мясной экстракт + экстракт дрожжей	10 г·л ⁻¹ + 10 г·л ⁻¹	200 AE/ см ³	
<i>E. faecium</i> SD4	Энтеро-цин SD4	Модифи-цированный MRS-бульон	Триптон	20 г·л ⁻¹	800 AE/ см ³	(Schirru et al. 2014)
			Мясной экстракт	20 г·л ⁻¹	400 AE/ см ³	
			Экстракт дрожжей	20 г·л ⁻¹	400 AE/ см ³	
			Триптон + мясной экстракт	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	200 AE/ см ³	
			Триптон + экстракт дрожжей	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	200 AE/ см ³	
			Мясной экстракт + экстракт дрожжей	10 г·л ⁻¹ + 10 г·л ⁻¹	400 AE/ см ³	
<i>E. faecium</i> SD4	Энтеро-цин SD4	Модифи-цированный MRS-бульон	Триптон	20 г·л ⁻¹	800 AE/ см ³	(Schirru et al. 2014)
			Мясной экстракт	20 г·л ⁻¹	400 AE/ см ³	
			Экстракт дрожжей	20 г·л ⁻¹	400 AE/ см ³	
			Триптон + мясной экстракт	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	200 AE/ см ³	
			Триптон + экстракт дрожжей	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	200 AE/ см ³	
			Мясной экстракт + экстракт дрожжей	10 г·л ⁻¹ + 10 г·л ⁻¹	400 AE/ см ³	
<i>E. faecium</i> SD4	Энтеро-цин SD4	Модифи-цированный MRS-бульон	Триптон	20 г·л ⁻¹	800 AE/ см ³	(Schirru et al. 2014)
			Мясной экстракт	20 г·л ⁻¹	400 AE/ см ³	
			Экстракт дрожжей	20 г·л ⁻¹	400 AE/ см ³	
			Триптон + мясной экстракт	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	200 AE/ см ³	
			Триптон + экстракт дрожжей	12.5 г·л ⁻¹ + 7.5 г·л ⁻¹	200 AE/ см ³	
			Мясной экстракт + экстракт дрожжей	10 г·л ⁻¹ + 10 г·л ⁻¹	400 AE/ см ³	

Примечание. Составлено по Sidooski et al. (2019).

Note. Compiled according to Sidooski et al. (2019).

Влияние биогенных факторов на синтез бактериоцинов

Физиологическое состояние культуры также оказывает значительное влияние. Часто максимальный уровень продукции достигается при условиях, отличающихся от оптимальных для роста клеток (Todorov & Dicks, 2006; Todorov et al., 2010). Хотя между ростом биомассы и синтезом бактериоцинов существует прямая связь, наилучшие условия для размножения клеток не всегда обеспечивают максимальную продукцию антимикробных пептидов (Mataragas et al., 2002).

В рамках подраздела проанализировано 18 работ, выделено 2 основных направления: влияние стадии роста и развития микроорганизма на синтез бактериоцинов, совместное культивирование МКБ как механизм усиления синтеза бактериоцинов.

Влияние стадии роста и развития микроорганизма на синтез бактериоцинов

Поскольку бактериоцины, синтезируемые молочнокислыми бактериями, с метаболической точки зрения относятся к первичным метаболитам, формирующимся в фазу экспоненциального роста (Bharti et al., 2015; Cabo et al., 2001; Papagianni & Sergelidis, 2013; Zamfir et al., 2000), скорость размножения клеток в данной фазе обычно соотносится с уровнем продукции бактериоцинов (Motta & Brandelli, 2003). Эта закономерность характерна для таких соединений, как низин A/Z (De Vuyst & Vandamme 1992; Parente et al. 1994), педиоцин PA1/SA-1 (Anastasiadou et al., 2008a), мизентероцин 5 (Daba et al., 1993), лактокоцин 140, лактострепцин, лактоцин 705 и леукоцин (Geisen et al., 1993).

При рассмотрении условий синтеза плантарицина, максимальная его продукция наблюдается в переходной фазе между активным ростом и стационарной стадией. В исследовании Todorov и др. (2010) проводили анализ двух штаммов *Lactiplantibacillus plantarum*. Результаты показывают, что при максимальном количестве клеток, полученном в промежутке от 28 до 34 ч, получается максимальная выработка бактериоцина от 26,000 до 101,000 AE/см³ (Рисунок 3).

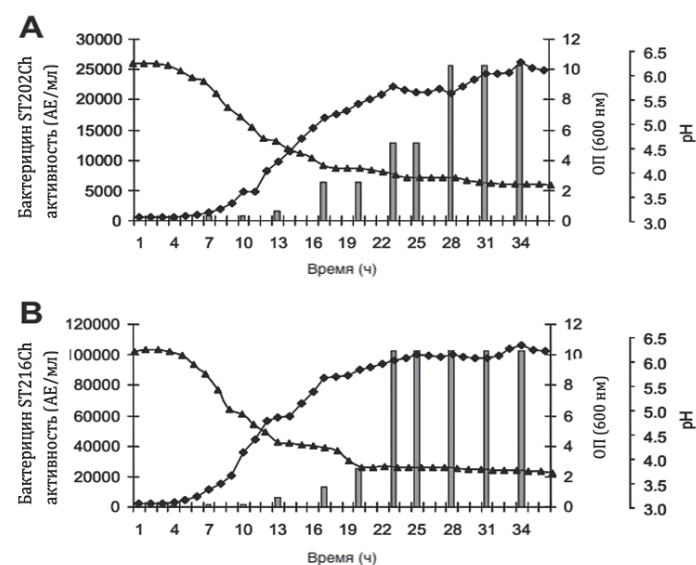
Максимальная продукция бактериоцинов у представителей *L. plantarum* достигается через 25÷28 часов культивирования, при стабилизации pH и выходе роста на плато. Снижение pH до 3.8 совпадает с пиком про-

Рисунок 3

Зависимость активности бактериоцинов *L. plantarum* от времени культивирования при температуре 30 °C

Figure 3

Dependence of Bacteriocin Activity of *L. plantarum* on Cultivation Time at 30 °C



Примечание. [A]: Увеличение производства *L. plantarum* ST202Ch и bacST202Ch в бульоне MRS (Biolab) в зависимости от времени культивирования. [B]: Увеличение производства *L. plantarum* ST216Ch и bacST216Ch в бульоне MRS (Biolab) в зависимости от времени культивирования. Составлено по: Todorov et al. (2010).

Note. [A]: Increase in the production of *L. plantarum* ST202Ch and bacST202Ch in MRS broth (Biolab) as a function of cultivation time. [B]: Increase in the production of *L. plantarum* ST216Ch and bacST216Ch in MRS broth (Biolab) as a function of cultivation time. Compiled according to Todorov et al. (2010).

дукции бактериоцинов, что указывает на зависимость синтеза от кислой среды. Также было отмечено, что воздействие внешних стрессов, таких как температурные или осмотические колебания, может усиливать синтез защитных белков, включая антимикробные пептиды. Такие условия активируют клеточные сигнальные пути и запускают адаптационные механизмы (Ljungh & Wadstrom, 2021).

Совместное культивирование как стратегия усиления синтеза плантарицина

Одним из эффективных направлений стимуляции бактериоциногенеза у молочнокислых бактерий является совместное культивирование с другими видами микроорганизмов. Такой подход позволяет активировать

И.Р. Соколов, В.М. Нсанова, В.М. Виноградов, М.С. Каночкина

механизмы межклеточной коммуникации, включая внутривидовые и межвидовые сигнальные пути. Ключевую роль в этом процессе играют молекулы кворум-сенсинга, в частности PInA и AI-2, способные координировать поведение популяции и индуцировать транскрипцию кластеров, ответственных за синтез бактериоцинов (см. Balciunas et al., 2023).

Эксперимент Liu et al. (2022) демонстрирует, что ко-культивирование бактериоцин-продуцирующего штамма *Lactiplantibacillus plantarum* RX-8 с *Bacillus subtilis* BS-15 приводит к значительному усилению продукции плантарицина по сравнению с монокультурой. Максимальный уровень продукции (2048 АЕ/см³) был достигнут при соотношении инокулята 1:1 (10⁶ КОЕ/см³ каждого штамма), что превышает контрольные значения в 32 раза (Таблица 4). Это соотношение также обеспечивало наивысший уровень транскрипции генов кластеров *pInABCD* и *pInEF*, а также регуляторных генов *pfs* и *luxS*, участвующих в синтезе AI-2.

Таблица 4

Схема инокуляции *L. plantarum* RX-8 и *B. subtilis* BS-15 в системах совместного культивирования с различными соотношениями инокулята

Table 4

Inoculation Scheme of *L. plantarum* RX-8 and *B. subtilis* BS-15 in Co-Culture Systems with Different Inoculum Ratios

Условия	<i>L. plantarum</i> RX-8	<i>B. subtilis</i> BS-15
1 (контроль 1)	10 ⁷	
2 (A)	10 ⁷	10 ⁶
3 (B)	10 ⁷	10 ⁵
4 (C)	10 ⁷	10 ⁴
5 (контроль 2)	10 ⁶	
6 (D)	10 ⁶	10 ⁶
7 (E)	10 ⁶	10 ⁵
8 (F)	10 ⁶	10 ⁴
9 (контроль 3)	10 ⁵	
10 (G)	10 ⁵	10 ⁶
11 (H)	10 ⁵	10 ⁵
12 (I)	10 ⁵	10 ⁴

Примечание. Составлено по Liu et al. (2022).

Note. Compiled according to Liu et al. (2022).

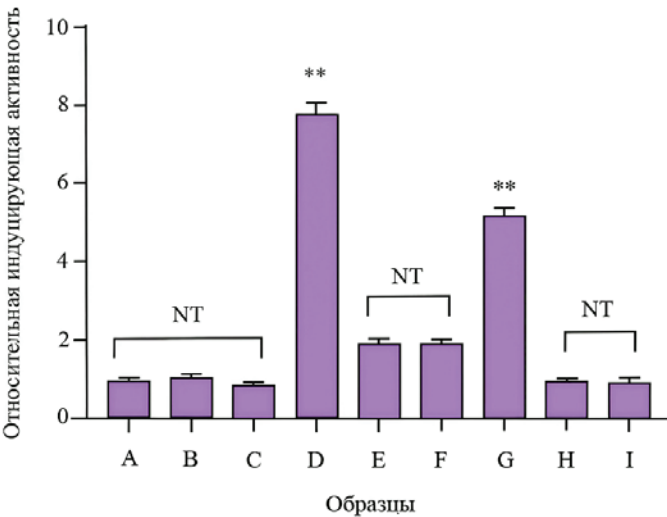
Примечательно, что повышение экспрессии сохранялось даже при добавлении D-рибозы — ингибитора синтеза AI-2, что свидетельствует о независимом функ-

Рисунок 4

Влияние различных соотношений инокулята на продукцию плантарицина в совместной культуре

Figure 4

Effect of Different Inoculum Ratios on Plantaricin Production in Co-Culture



Примечание. NT указывает на отсутствие существенных различий в результатах в контроле; * $p < 0,05$ и ** $p < 0,01$. Составлено по Liu et al. (2022).

Note. NT indicates no significant differences in the control results; * $p < 0.05$ and ** $p < 0.01$. Compiled according to Liu et al. (2022).

ционировании двух сигнальных систем: PInA-опосредованной внутривидовой и AI-2-опосредованной межвидовой (Рисунок 4). Результаты ОТ-ПЦР, полученные с 4-часовыми интервалами в течение 32 часов, подтверждают устойчивый рост транскрипционной активности при наличии *B. subtilis*.

Сравнительный анализ различных соотношений инокулята (см. Таблица 6) показал, что индуцирующий эффект наблюдается только в узком диапазоне соотношений. Наибольшая продукция плантарицина зафиксирована при вариантах D и E (соотношения 1:1 и 1:10), где уровни продукции возрастали в 5–9 раз. При других соотношениях синтез либо не усиливался, либо снижался, что подчёркивает важность точного баланса инокулята для достижения максимального биосинтетического отклика.

Таким образом, данные свидетельствуют о том, что совместное культивирование с *B. subtilis* может служить надёжной моделью для запуска бактериоциногенеза у *L. plantarum*, при этом механизмы индукции плантари-

цина реализуются через два независимых сигнальных контура, усиливающих эффективность друг друга.

Методы с использованием генной инженерии

Генетическая природа МКБ — продуцентов бактериоцинов определяет потенциал к бактериоциногенезу. Наличие соответствующих генов, их экспрессия и локализация на плаزمиде формируют основу для продуктивности. Установлено, что активные регуляторные системы, включая элементы кворум-сенсинга, играют ключевую роль в инициации синтеза. Их активация может происходить в зависимости от плотности клеточной популяции и условий среды (Dobson et al., 2012). В данном подразделе проанализировано 14 публикаций, которые посвящены различным генно-инженерным стратегиям, включая экспрессию кластеров и регуляцию PlnA-системы.

Наиболее релевантными являются стратегии гетерологической экспрессии. Для получения большого количества двухпептидного бактериоцина PlnJK с целью

гетерологической экспрессии применяют пищевую систему регуляции экспрессии на основе низина. В исследованиях (Xu et al., 2019) были сконструированы рекомбинантные плазмиды pNZ8124-plnJ и pNZ8124-plnK, что позволило достичь экспрессии пептидов PlnJ и PlnK в штамме *L. lactis* NZ9000 (Рисунок 5).

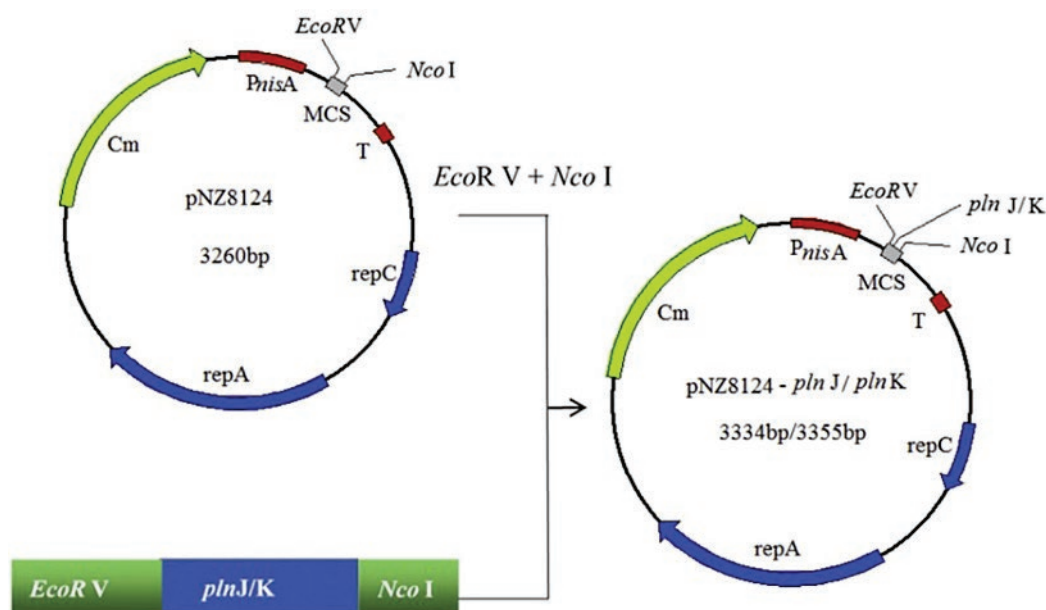
Для очистки полученных рекомбинантных белков использовали последовательную комбинацию методов: макропористую смолу XAD-2, колонку с сильными катионообменными свойствами и высокоэффективную жидкостную хроматографию с обращённой фазой. Молекулярные массы пептидов были количественно определены с использованием электроспрей-ионизационной масс-спектрометрии (ESI-MS) и составили 2929,32 Да для PlnJ и 3502,89 Да для PlnK. Итоги исследования продемонстрировали выраженную активность PlnJK против различных штаммов стафилококка, причём оба пептида проявляли синергетическое действие (Таблица 5). Проведённый флуоресцентный анализ показал, что PlnJK увеличивает проницаемость клеточных мембран, вызывая потери ионов, потерю электролитов и приводя к клеточной гибели (Xu et al., 2019).

Рисунок 5

Рекомбинантные плазмиды pNZ8124-plnJ и pNZ8124-plnK

Figure 5

Recombinant Plasmids pNZ8124-plnJ and pNZ8124-plnK



Примечание. Составлено по Xu et al. (2019).

Note. Compiled according to Xu et al. (2019).

И.П. Соколов, В.М. Нсанова, В.М. Виноградов, М.С. Каночкина

Таблица 5

Спектр ингибирования бактериоцина PlnJ, PlnK, PlnJK
Table 5
Inhibition Spectrum of the Bacteriocins PlnJ, PlnK, and PlnJK

Индикаторные штаммы	Антимикробная активность		
	PlnJ	PlnK	PlnJK
<i>Staphylococcus citreus</i> LC5	–	+	++
<i>Micrococcus luteus</i> 10209	–	–	+
<i>Bacillus subtilis</i> BAS2	–	–	++
<i>Staphylococcus muscae</i>	–	–	+
<i>Staphylococcus simulans</i>	–	–	++
<i>Staphylococcus carnosus</i> pCA44	–	+	++
<i>Staphylococcus carnosus</i> pCT20	–	–	++
<i>Lactiplantibacillus plantarum</i> ZFM811	–	++	+++
<i>Limosilactobacillus fermentum</i> ZFM012	+	++	++
<i>Lactococcus lactis</i> NZ9000	–	–	–

Примечание. Составлено по: Xu et al. (2019)
Note. Compiled according to Xu et al. (2019).

Согласно корпусу данного обзора, бактериоцин PlnJ активен только против *L. fermentum*, а PlnK ингибирует *S. citreus*, *S. carnosus*, *L. fermentum* и *L. plantarum*. Комбинация PlnJK подавляет большинство штаммов, включая устойчивые к отдельным пептидам, такие как *B. subtilis*

BAS2, *S. simulans*, *S. carnosus* pCT20 и *M. luteus*. PlnJK демонстрирует наибольшую активность и широкий спектр действия. Однако, следует учитывать, что *L. fermentum* и *L. plantarum* являются представителями облигатной микрофлоры кишечника, то есть подобные стратегии требуют доработки.

Перспективы применения бактериоциногенных штаммов молочнокислых бактерий

В пищевой индустрии бактериоциногенные штаммы МКБ находят применение в качестве элементов био-консервации (Таблица 6).

Использование бактериоциногенных культур в составе заквасок позволяет одновременно обеспечивать процессы ферментации и подавлять рост патогенной микрофлоры (Salminen et al., 2022, Лоозе В. В., Костромина & Солдатова, 2024). Особое значение имеют разработки для молочной отрасли, где такие штаммы предотвращают развитие *Listeria monocytogenes*, улучшая безопасность и увеличивая срок хранения готовой продукции (Егоров, 2020; Nes et al., 2020; Солдатова и соавт., 2019). Перспективным направлением становится создание защитных биопленок на основе бактериоцинов, предназначенных для обработки поверхности мясных и рыбных продуктов. Защитная биопленка позволяет

Таблица 6

Бактериоцины используемые в промышленности и медицине
Table 6
Bacteriocins Used in Industry and Medicine

Бактериоцин	Продуцент	Класс	Свойства и механизм действия	Применение
Низин	<i>L. lactis</i>	I	Лантибиотик, термостабилен (выдерживает до 120°C), образует поры в мембранах, связываясь с липидом II. Подавляет грамположительные бактерии (например, <i>Listeria</i> spp.).	Пищевая промышленность (консервант E234), сыры, мясные продукты. Изучается для медицинского применения.
Лактококцин А	<i>L. lactis</i>	II	Связывается с маннозо-фосфотрансферазной системой (Man-PTS), вызывая лизис клеток.	Пробиотики, биоконсерванты для молочных продуктов.
Энтероцины	<i>E. faecium</i>	II	Термостабильные пептиды, подавляют <i>L. monocytogenes</i> и другие патогены.	Пищевая безопасность (сырокопченые колбасы), пробиотические препараты.
Лактоцины	<i>L. plantarum</i>	II	Нарушают целостность мембран грамположительных бактерий. Широкий спектр активности.	Функциональные продукты, лечение дисбиозов.
Педиоцин	<i>Pediococcus</i> spp.	II	Устойчив к высоким температурам и pH 3–9. Подавляет <i>Listeria</i> spp.	Мясные и овощные консервы, молочные продукты.

Примечание. Составлено по Savadogo (2019).
Note. Compiled according to Savadogo (2019).

отказаться от применения химических консервантов, сохраняя органолептические и микробиологические свойства продуктов на протяжении длительного времени (Alvarez-Sieiro et al., 2016; Гусева и соавт., 2021).

В медицинской практике бактериоциногенные штаммы рассматриваются как потенциальная альтернатива антибиотикам, особенно в условиях распространения устойчивых к терапии микроорганизмов. Исследования фокусируются на создании препаратов на основе бактериоцинов для лечения инфекций, вызванных мультирезистентными патогенами. В пробиотикотерапии использование этих штаммов усиливает антагонистическую активность микробиоценоза кишечника, снижая риск развития воспалительных и инфекционных заболеваний (Savadogo, 2019; Alvarez-Sieiro et al., 2016; Dobson et al., 2012). В стоматологии проводится оценка эффективности бактериоцинов против кариесогенной микрофлоры, а в хирургии — возможности их применения в составе ранозаживляющих покрытий с антисептическими свойствами (Ljungh & Wadstrom, 2021; Mozzi et al., 2020; Holzapfel & Wood, 2018).

Промышленная биотехнология также открывает широкий спектр применений бактериоциногенных штаммов. Их внедрение в состав биокаталитических систем позволяет предотвращать микробные загрязнения на различных стадиях производства (см. Таблица 6). Создание антимикробных биоматериалов, разработка защищённых от биоповреждений технологических процессов и систем биоремедиации расширяют функциональность таких культур за пределы традиционных сфер использования (Holzapfel & Wood, 2018). Интеграция бактериоциногенеза в замкнутые производственные циклы обеспечивает автономную биозащиту и минимизирует необходимость во внешней стерилизации.

Установлено, что параметры среды культивирования, включая уровень pH (оптимально 3.0÷6.5 ед. pH), температуру (около 30 °C), оказывают критическое влияние на продуктивность бактериоциногенных штаммов (Pattnaik, 2001). Существенное увеличение выхода целевых соединений достигается за счёт использования сбалансированных источников углерода (глюкоза, лактоза, манноза) и азота (дрожжевой экстракт, триптон, мясной пептон), а также при добавлении индукционных веществ, включая PlnA и AI-2. Совместное культивирование с культурами других видов и родов усиливает синтез отдельных бактериоцинов в десятки раз — плантарицина в 32 раза по сравнению с монокультурой. Ис-

пользование генно-инженерных подходов, таких как гетерологичная экспрессия, на примере *L. lactis* генов PlnJ и PlnK с помощью системы NICE, позволило получить активные пептиды, обладающие синергетической антимикробной активностью против широкого спектра грамположительных бактерий.

Таким образом, повышение выхода бактериоцинов возможно при интеграции биохимических, технологических и молекулярно-генетических стратегий. Это обеспечивает стабильное и масштабируемое производство активных форм антимикробных пептидов, что открывает широкие перспективы для их применения в пищевой, медицинской и ветеринарной биотехнологии. Основным направлением практического использования данного обзора и дальнейших исследований представляется разработка схемы комбинированного подхода, включающего оптимизацию среды, применение направленной индукции и современных биотехнологических решений для значительного повышения выхода бактериоцинов вида *L. lactis* и *L. plantarum*.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Цель настоящего обзора заключалась в систематизации современных подходов к усилению синтеза бактериоцинов у представителей семейства *Lactobacillaceae*. Полученные результаты показывают, что большинство исследований сосредоточено на трех ключевых направлениях: (1) оптимизация условий культивирования, (2) моделирование межвидовых взаимодействий (включая ко-культивирование), и (3) применение генно-инженерных и синтетических подходов.

Наибольшее количество проанализированных публикаций посвящено влиянию условий культивирования на уровень продукции бактериоцинов. Эти данные согласуются с классическими и современными исследованиями (Aasen et al., 2000; Daba et al., 1993; Cheigh et al., 2002), в которых установлено, что такие параметры как pH, температура, аэрация и состав среды существенно влияют на активность бактериоциногенеза. Например, Abo-Amer (2011) показал, что оптимизация источников углерода и азота позволяет существенно повысить синтез антимикробных пептидов *L. acidophilus*. Подобные результаты получены и для других штаммов (Anthony et al., 2009; Guerra & Pastrana, 2001), что подтверждает обоснованность стратегий по подбору компонент среды.

Второе по значимости направление связано с усилением синтеза через межклеточные взаимодействия, особенно в системах ко-культуры. Исследование Liu et al. (2022) демонстрирует, что совместное культивирование *Lactiplantibacillus plantarum* RX-8 с *Bacillus subtilis* BS-15 активирует обе системы кворум-сенсинга — PInA и AI-2, что приводит к экспоненциальному росту продукции плантарицина. Эти данные согласуются с обзором Balciunas et al. (2023), в котором подчеркивается роль межвидовой коммуникации в регуляции кластеров синтеза бактериоцинов. Однако важно отметить, что данное направление пока недостаточно стандартизировано: оптимальные соотношения инокулята и режимы совместного роста определяются эмпирически и варьируют между штаммами.

Что касается генно-инженерных подходов, они представлены в обзоре меньшим числом публикаций, однако обладают высоким потенциалом. Liu et al. (2022) описывают использование системы CRISPR-Cas9 для усиления экспрессии кластеров *plnABCD* в *Lactococcus lactis*, что демонстрирует возможность точечной регуляции синтеза бактериоцинов. Аналогичные выводы представлены в работе Xu et al. (2019), где реализована гетерологичная экспрессия пептидов класса IIb в системах *L. lactis*. Несмотря на перспективность, подобные подходы требуют дополнительной адаптации к условиям пищевого и медицинского производства, включая правовое регулирование и биобезопасность (Shin et al., 2021).

Вместе с тем, необходимо отметить и ограничения текущих исследований. Во-первых, как показали Schirru et al. (2014) и Sidooski et al. (2019), отсутствует единый подход к нормализации данных по активности бактериоцинов, что затрудняет прямое сравнение между различными штаммами и условиями культивирования. Во-вторых, в ряде публикаций (например, Todorov et al., 2010; De Carvalho et al., 2009) наблюдается смещение фокуса в сторону лабораторных условий, в то время как данные о продуктивности в моделях пищевых систем остаются ограниченными.

Таким образом, можно заключить, что на текущем этапе наибольший практический потенциал демонстрируют стратегии, сочетающие адаптацию среды и сигнальную индукцию. В перспективе приоритетными направлениями остаются стандартизация ко-культур, биоинформатическое моделирование регуляторных путей, а также

интеграция генно-инженерных методов с технологическими платформами биопроизводства. Продолжение междисциплинарных исследований в этом направлении может обеспечить разработку промышленно релевантных решений без увеличения производственных издержек и риска снижения биоактивности пептидов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный систематический обзор источников подтвердил, что усиление синтеза бактериоцинов у представителей семейства *Lactobacillaceae* возможно за счёт комплексного управления как внешними условиями культивирования, так и внутренними молекулярно-генетическими механизмами регуляции. Наибольшую экспериментальную подтвержденность получили подходы, основанные на оптимизации питательной среды и параметров роста, а также ко-культивировании с индуцирующими штаммами, стимулирующими системы кворум-сенсинга. Генно-инженерные решения, хотя и демонстрируют высокий потенциал, в настоящий момент ограничены в применении вследствие отсутствия стандартизации и нормативных механизмов внедрения в пищевую и медицинскую биотехнологию.

Обобщенные данные обзора показывают, что наиболее эффективными стратегиями являются комбинированные подходы, сочетающие физико-химическую оптимизацию среды с использованием сигнальных молекул и гетерологичной экспрессии. Эти решения позволяют существенно повысить выход бактериоцинов без увеличения метаболической нагрузки на продуцирующий штамм и могут служить основой для масштабирования производственных процессов.

Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на разработке воспроизводимых моделей ко-культуры, стандартизации условий культивирования, а также валидации синтетических и генно-инженерных конструкций в реальных технологических системах. Учитывая растущий интерес к биологическим методам консервации и контроля микробиоты, бактериоцины молочнокислых бактерий остаются перспективным объектом для междисциплинарных биотехнологических решений.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Илья Романович Соколов: разработка методологии; формальный анализ; курирование данных; визуализация; написание черновика рукописи; валидация результатов.

Виктория Максимовна Нсанова: проведение исследования; курирование данных; визуализация; написание черновика рукописи.

Максим Владимирович Виноградов: проведение исследования; курирование данных; визуализация; написание черновика рукописи.

Мария Сергеевна Каночкина: разработка концепции; разработка методологии; научное руководство; написание рукописи — рецензирование и редактирование; административное руководство исследовательским проектом.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ilya R. Sokolov: methodology; formal analysis; data curation; visualization; writing — original draft; validation.

Viktoria M. Nsanova: investigation; data curation; visualization; writing — original draft.

Maksim V. Vinogradov: investigation; data curation; visualization; writing — original draft.

Maria S. Kanochkina: conceptualization; methodology; supervision; writing — review & editing; project administration.

ЛИТЕРАТУРА

- Гусева, Т. Б., Солдатова, С. Ю., & Караньян, О. М. (2021). Органолептическая оценка молочных консервов: особенности проведения и интерпретации результатов. *Товаровед продовольственных товаров*, 10, 726–729. <https://doi.org/10.33920/igt-01-2110-01>
- Егоров, Н. С. (2020). Основы биотехнологии молочнокислых бактерий. СПб.: Профессия.
- Кишилова С. А., Терехова Р. П., Рожкова И. В., & Юрова Е. А. (2023). Сравнительная оценка антагонистической активности коллекционных лактобацилл в отношении полирезистентных *Klebsiella pneumoniae*. *Вопросы питания*, 92(6), 120–127. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-6-120-127>
- Лоозе, В. В., Костромина, Т. Г., & Солдатова, С. Ю. (2024). Новые возможности научных исследований сохранности государственных запасов в многолетней мерзлоте. *Научное обеспечение технологического развития и повышения конкурентоспособности в пищевой и перерабатывающей промышленности* (с. 69–74). Москва: Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова.
- Солдатова, С. Ю., Филатова, Г. Л., & Куликовская, Т. С. (2019). Листерииоз — эмерджентная инфекция с пищевым путем передачи. *Вестник Нижневартковского государственного университета*, 2, 110–117. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/19-2/14>
- Aasen, I. M., Møretro, T., Katla, T., Axelsson, L., & Storrø, I. (2000). Influence of nutrients, temperature and pH on bacteriocin production by *Lactobacillus sakei*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 53(2), 159–166. <https://doi.org/10.1007/s002530050003>
- Abanoz, H. S., Kunduhoglu, B. (2021). Antimicrobial activity of bacteriocins against food pathogens. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3315–3337. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12769>
- Abo-Amer, A. E. (2011). Optimization of bacteriocin production by *Lactobacillus acidophilus* AA11, a strain isolated from Egyptian cheese. *Annals of Microbiology*, 61(3), 445–452. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0157-6>
- Alvarez-Sieiro, P., Montalbán-López, M., Mu, D., & Kuipers, O. P. (2016). Bacteriocins of lactic acid bacteria: extending the family. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(7), 2939–2951. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7343-9>
- Anastasiadou, S., Papagianni, M., Filiouis, G., Ambrosiadis, I., Koidis, P. (2008). Growth and metabolism of a meat isolated strain of *Pediococcus pentosaceus* in submerged fermentation. *Enzyme and Microbial Technology*, 43(6), 448–454. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2008.05.007>

- Anthony, T., Rajesh, T., Kayalvizhi, N., & Gunasekaran, P. (2009). Influence of medium and fermentation conditions on bacteriocin production by *Bacillus licheniformis* AnBa9. *Bioresource Technology*, 100(2), 872–877. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.027>
- Balciunas, E. M., Saleh A. (2023). Novel bacteriocins from *Enterococcus* spp.: biotechnological potential. *Biotechnology Letters*, 45(2), 189–201. <https://doi.org/10.1007/s10529-022.03327-9>
- Bharti, V., Mehta, A., Singh, S., Jain, N., Ahirwal, L., & Mehta, S. (2015). Bacteriocin: A novel approach for preservation of food. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 7(9), 1–10.
- Cabo, M. L. (2001). Effects of aeration and pH gradient on nisin production. *Enzyme and Microbial Technology*, 29(4–5), 264–273. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(01\)00378-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(01)00378-7)
- Cheigh, C. I., Choi, H. J., Park, H., Kim, S. B., Kook, M. C., Kim, T. S., Hwang, J. K., & Pyun, Y. R. (2002). Influence of growth conditions on the production of a nisin-like bacteriocin by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* A164. *Journal of Biotechnology*, 95(3), 225–235. [https://doi.org/10.1016/s0168-1656\(02\)00010-x](https://doi.org/10.1016/s0168-1656(02)00010-x)
- Daba, H., Lacroix, C., Huang, J. (1993). Influence of growth conditions on production and activity of mesenterocin 5 by a strain of *Leuconostoc mesenteroides*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 39(2), 166–173. <https://doi.org/10.1007/BF00228601>
- De Arauz, L. J. (2009). Nisin biotechnological production and application: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 20(3–4), 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.01.056>
- De Carvalho, A. T. (2009). The effect of carbon and nitrogen sources on bovicin HC5 production by *Streptococcus bovis* HC5. *Journal of Applied Microbiology*, 107(1), 339–347. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04212.x>
- De Vuyst, L. (1994). Lactostrepcins, bacteriocins produced by *Lactococcus lactis* strains. In: *Bacteriocins of Lactic Acid Bacteria*, 291–299. Boston: MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2668-1_9
- Dobson, A., Cotter, P. D., Ross, R. P., & Hill, C. (2012). Bacteriocin production: a probiotic trait? *Applied and Environmental Microbiology*, 78(1), 1–6. <https://doi.org/10.1128/AEM.05576-11>
- Dominguez, A. P. M. (2007). Cerein 8A production in soybean protein using response surface methodology. *Biochemical Engineering Journal*, 35(2), 238–243. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.01.019>
- Garsa, A. K., Kumariya, R., Sood, S. K., Kumar, A., & Kapila, S. (2014). Bacteriocin production and different strategies for their recovery and purification. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 6(1), 47–58. <https://doi.org/10.1007/s12602-013-9153-z>
- Geisen, R., Becker, B. & Holzapfel, W.H. (1993). Bacteriocin production of *Leuconostoc carnosum* LA54A at different combinations of pH and temperature. *Journal of Industrial Microbiology*, 12(3–5), 337–340. <https://doi.org/10.1007/BF01584211>
- Gharsallaoui, A. (2020). Structural and functional insights into class IIa bacteriocins. *Biochemical Journal*, 477(1), 1–15. <https://doi.org/10.1042/BCJ20190475>
- Gong, X. (2023). Immobilized cell systems for bacteriocin production. *Bioresource Technology*, 370, 128523. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128523>
- Guerra, N. P., & Pastrana, L. (2001). Enhanced nisin and pediocin production on whey with nitrogen sources. *Biotechnology Letters*, 23(8), 609–612. <https://doi.org/10.1023/A:1010324910806>
- Guerra, N. P. (2008). Modelling biphasic growth and pediocin production by *Pediococcus acidilactici* in fed-batch cultures. *Biochemical Engineering Journal*, 40(3), 465–472. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.02.001>
- Holzapfel, W. H., Wood, B. J. B. (Eds.). (2018). *Lactic Acid Bacteria: Biodiversity and Taxonomy* (2nd ed.). Hoboken: Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118995255>
- Kim, W., Hall, R. & Dunn, N. (1997). The effect of nisin concentration and nutrient depletion on nisin production of *Lactococcus lactis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 48(4), 449–453. <https://doi.org/10.1007/s002530051078>
- Liu, G. (2022). CRISPR-Cas9 engineering of *Lactococcus lactis* for enhanced nisin yield. *ACS Synthetic Biology*, 11(3), 1123–1135. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.1c00567>
- Liu, G., Nie, R., Liu, Y., Li, X., Duan, J., Hao, X., Shan, Y., & Zhang, J. (2022). *Bacillus subtilis* BS-15 Effectively Improves Plantaricin Production and the Regulatory Biosynthesis in *Lactiplantibacillus plantarum* RX-8. *Frontiers in microbiology*, 12, 772546. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.772546>

- Ljungh, A., Wadstrom, T. (Eds.). (2021). *Lactobacillus* Molecular Biology (4th ed.). Norfolk: Caister Academic Press. <https://doi.org/10.21775/9781913652619>
- Luesink, E. J. (1998). Transcriptional regulation of the *las* and *gal* operons in *Lactococcus lactis*. *Molecular Microbiology*, 30(4), 789–798. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.1998.01111.x>
- Mataragas, M. (2002). Characterization of two bacteriocins produced by *Leuconostoc mesenteroides* L124 and *Lactobacillus curvatus* L442, isolated from dry fermented sausages. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 18(9), 847–856. <https://doi.org/10.1023/A:1021239008582>
- Miao, J. (2015). Optimization of culture conditions for the production of antimicrobial substances by probiotic *Lactobacillus paracasei* subsp. *tolerans* FX-6. *Journal of Functional Foods*, 18, 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.07.011>
- Montville, T. J., Matthews, K. R. (2021). *Food Microbiology: An Introduction* (4th ed.). Washington: ASM Press. <https://doi.org/10.1128/9781555819974>
- Moretro, T. (2000). Production of sakacin P by *Lactobacillus sakei* in defined medium. *Journal of Applied Microbiology*, 88(3), 536–545. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2000.00994.x>
- Motta, A. S., & Brandelli, A. (2003). Influence of growth conditions on bacteriocin production by *Brevibacterium linens*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 62(2–3), 163–167. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1292-9>
- Mozzi, F. (2020). *Biotechnology of Lactic Acid Bacteria: Novel applications* (2nd ed.). Hoboken: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119593132>
- Nes, I. F. (2020). *Bacteriocins of Lactic Acid Bacteria: Microbiology, genetics and applications*. Hoboken: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119599819>
- Papagianni, M., & Sergelidis, D. (2013). Effects of the presence of the curing agent sodium nitrite on bacteriocin production by *Weissella paramesenteroides* DX. *Enzyme and Microbial Technology*, 53(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2013.04.003>
- Papagianni, M. (2007). Investigating the relationship between the specific glucose uptake rate and nisin production in cultures of *Lactococcus lactis*. *Enzyme and Microbial Technology*, 40(6), 1557–1563. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2006.10.035>
- Parente, E., & Hill, C. (1992). A comparison of factors affecting the production of two bacteriocins from lactic acid bacteria. *Journal of Applied Bacteriology*, 73(4), 290–298. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1992.tb04980.x>
- Parente, E., & Ricciardi, A. (1994). Influence of pH on the production of enterocin 1146 during batch fermentation. *Letters in Applied Microbiology*, 19(1), 12–15. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.1994.tb00891.x>
- Parente, E. (1994). Influence of pH on growth and bacteriocin production by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* 140Nwc. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 41(4), 388–389.
- Pattnaik, P. (2001). Purification and characterization of a bacteriocin-like compound (Lichenin) produced anaerobically by *Bacillus licheniformis*. *Journal of Applied Microbiology*, 91(4), 636–645. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2001.01429.x>
- Pattnaik, P. (2005). Effect of environmental factors on production of lichenin by *Bacillus licheniformis* 26L-10/3RA. *Microbiological Research*, 160(2), 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2005.01.006>
- Salminen, S. (2022). *Lactic Acid Bacteria: Microbiological and functional aspects* (5th ed.). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003049223>
- Savadogo, A. (2019). *Bacteriocins and food safety*. London: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02385-7>
- Schirru, S. (2014). Comparison of bacteriocins production from *Enterococcus faecium* strains in cheese whey and MRS medium. *Annals of Microbiology*, 64(1), 321–331. <https://doi.org/10.1007/s13213-013-0667-0>
- Settanni, L., & Corsetti, A. (2008). Application of bacteriocins in vegetable food biopreservation. *International Journal of Food Microbiology*, 121(2), 123–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.09.001>
- Shin, J. M., et al. (2021). Heterologous expression of bacteriocins using lactic acid bacteria. *Metabolic Engineering*, 67, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jymben.2021.05.007>

- Sidooski, T., Brandelli, A., Bertoli, S. L., Souza, C. K., & Carvalho, L. F. (2019). Physical and nutritional conditions for optimized production of bacteriocins by lactic acid bacteria — A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(17), 2839–2849. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1474852>
- Sonomoto, K., Yokota, A. (Eds.). (2021). *Lactic Acid Bacteria: Engineering and applications* (2nd ed.). Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6236-9>
- Stiles, M. E., & Holzapfel, W. H. (2022). *Lactic Acid Bacteria: Microbiological and functional aspects* (5th ed.). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003049223>
- Todorov, S. D. (2006). Effect of medium components on bacteriocin production by *Lactobacillus plantarum* strains ST23LD and ST341LD, isolated from spoiled olive brine. *Microbiological Research*, 161(2), 102–128. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2005.06.006>
- Todorov, S. D. (2010). Characterization of bacteriocins produced by two strains of *Lactobacillus plantarum* isolated from Beloura and Chourico, traditional pork products from Portugal. *Meat Science*, 84(3), 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.08.053>
- Vignolo, G. M. (2000). Influence of growth conditions on the production of lactocin 705 by *Lactobacillus casei* CRL 705. *Journal of Applied Bacteriology*, 78(1), 5–10. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1995.tb01665.x>
- Xu, Y., Yang, L., Li, P., & Gu, Q. (2019). Heterologous expression of Class IIb bacteriocin Plantaricin JK in *Lactococcus lactis*. *Protein Expression and Purification*, 159, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2019.02.013>
- Yang, R., & Ray, B. (1994). Factors influencing production of bacteriocins by lactic acid bacteria. *Food Microbiology*, 11(4), 281–291. <https://doi.org/10.1006/fmic.1994.1032>
- Yang, S. C. (2023). Next-generation bacteriocins: expanding the synthetic biology toolbox. *Nature Reviews Chemistry*, 7(2), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41570-022-00450-1>
- Zamfir, M. (2000). Production kinetics of acidophilin 801 by *Lactobacillus acidophilus* IBB 801. *FEMS Microbiology Letters*, 190(2), 305–308. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2000.tb09303.x>

REFERENCES

- Guseva, T.B., Soldatova, S.Yu., & Karanyan, O.M. (2021). Organoleptic assessment of canned dairy products: Features of carrying it out and interpreting the results. *Food Products Commodity Expert*, 10, 726–729. <https://doi.org/10.33920/igt-01-2110-01>
- Egorov, N. S. (2020). *Fundamentals of lactic acid bacteria biotechnology*. St. Petersburg: Profession.
- Kishilova, S.A., Terekhova, R.P., Rozhkova, I.V., & Yurova, E.A. (2023). Comparative evaluation of the antagonistic activity of collection lactobacilli against the multidrug-resistant *Klebsiella pneumoniae*. *Voprosy Pitaniia* [Problems of Nutrition], 92(6), 120–7. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-6-120-127>
- Loze, V. V., Kostromina, T. G., & Soldatova, S. Yu. (2024). *New research opportunities for preserving state reserves in permafrost conditions*. In *Scientific support for technological development and competitiveness enhancement in the food and processing industry* (pp. 69–74). Moscow: V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems.
- Soldatova, S.Y., Filatova, G.L., & Kulikovskaya, T.S. (2019). A study of potential *Listeriosis*: An emerging food-borne disease. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, (2), 110–117. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/19-2/14>
- Aasen, I. M., Møretrø, T., Katla, T., Axelsson, L., & Storrø, I. (2000). Influence of nutrients, temperature and pH on bacteriocin production by *Lactobacillus sakei*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 53(2), 159–166. <https://doi.org/10.1007/s002530050003>
- Abanoz, H. S., Kunduhoglu, B. (2021). Antimicrobial activity of bacteriocins against food pathogens. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3315–3337. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12769>
- Abo-Amer, A. E. (2011). Optimization of bacteriocin production by *Lactobacillus acidophilus* AA11, a strain isolated from Egyptian cheese. *Annals of Microbiology*, 61(3), 445–452. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0157-6>

- Alvarez-Sieiro, P., Montalbán-López, M., Mu, D., & Kuipers, O. P. (2016). Bacteriocins of lactic acid bacteria: extending the family. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(7), 2939–2951. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7343-9>
- Anastasiadou, S., Papagianni, M., Filiouis, G., Ambrosiadis, I., Koidis, P. (2008). Growth and metabolism of a meat isolated strain of *Pediococcus pentosaceus* in submerged fermentation. *Enzyme and Microbial Technology*, 43(6), 448–454. <https://doi.org/10.1016/j.enzmtec.2008.05.007>
- Anthony, T., Rajesh, T., Kayalvizhi, N., & Gunasekaran, P. (2009). Influence of medium and fermentation conditions on bacteriocin production by *Bacillus licheniformis* AnBa9. *Bioresource Technology*, 100(2), 872–877. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.027>
- Balciunas, E. M., Saleh A. (2023). Novel bacteriocins from *Enterococcus* spp.: biotechnological potential. *Biotechnology Letters*, 45(2), 189–201. <https://doi.org/10.1007/s10529-022.03327-9>
- Bharti, V., Mehta, A., Singh, S., Jain, N., Ahirwal, L., & Mehta, S. (2015). Bacteriocin: A novel approach for preservation of food. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 7(9), 1–10.
- Cabo, M. L. (2001). Effects of aeration and pH gradient on nisin production. *Enzyme and Microbial Technology*, 29(4–5), 264–273. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(01\)00378-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(01)00378-7)
- Cheigh, C. I., Choi, H. J., Park, H., Kim, S. B., Kook, M. C., Kim, T. S., Hwang, J. K., & Pyun, Y. R. (2002). Influence of growth conditions on the production of a nisin-like bacteriocin by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* A164. *Journal of Biotechnology*, 95(3), 225–235. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00010-X)
- Daba, H., Lacroix, C., Huang, J. (1993). Influence of growth conditions on production and activity of mesenterocin 5 by a strain of *Leuconostoc mesenteroides*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 39(2), 166–173. <https://doi.org/10.1007/BF00228601>
- De Arauz, L. J. (2009). Nisin biotechnological production and application: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 20(3–4), 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.01.056>
- De Carvalho, A. T. (2009). The effect of carbon and nitrogen sources on bovicin HC5 production by *Streptococcus bovis* HC5. *Journal of Applied Microbiology*, 107(1), 339–347. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04212.x>
- De Vuyst, L. (1994). Lactostreptocins, bacteriocins produced by *Lactococcus lactis* strains. In: *Bacteriocins of Lactic Acid Bacteria*, 291–299. Boston: MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2668-1_9
- Dobson, A., Cotter, P. D., Ross, R. P., & Hill, C. (2012). Bacteriocin production: a probiotic trait? *Applied and Environmental Microbiology*, 78(1), 1–6. <https://doi.org/10.1128/AEM.05576-11>
- Dominguez, A. P. M. (2007). Cerein 8A production in soybean protein using response surface methodology. *Biochemical Engineering Journal*, 35(2), 238–243. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.01.019>
- Garsa, A. K., Kumariya, R., Sood, S. K., Kumar, A., & Kapila, S. (2014). Bacteriocin production and different strategies for their recovery and purification. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 6(1), 47–58. <https://doi.org/10.1007/s12602-013-9153-z>
- Geisen, R., Becker, B. & Holzapfel, W.H. (1993). Bacteriocin production of *Leuconostoc carnosum* LA54A at different combinations of pH and temperature. *Journal of Industrial Microbiology*, 12(3–5), 337–340. <https://doi.org/10.1007/BF01584211>
- Gharsallaoui, A. (2020). Structural and functional insights into class IIa bacteriocins. *Biochemical Journal*, 477(1), 1–15. <https://doi.org/10.1042/BCJ20190475>
- Gong, X. (2023). Immobilized cell systems for bacteriocin production. *Bioresource Technology*, 370, 128523. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128523>
- Guerra, N. P., & Pastrana, L. (2001). Enhanced nisin and pediocin production on whey with nitrogen sources. *Biotechnology Letters*, 23(8), 609–612. <https://doi.org/10.1023/A:1010324910806>
- Guerra, N. P. (2008). Modelling biphasic growth and pediocin production by *Pediococcus acidilactici* in fed-batch cultures. *Biochemical Engineering Journal*, 40(3), 465–472. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.02.001>
- Holzapfel, W. H., Wood, B. J. B. (Eds.). (2018). *Lactic Acid Bacteria: Biodiversity and Taxonomy* (2nd ed.). Hoboken: Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118995255>
- Kim, W., Hall, R. & Dunn, N. (1997). The effect of nisin concentration and nutrient depletion on nisin production of *Lactococcus lactis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 48(4), 449–453. <https://doi.org/10.1007/s002530051078>

- Liu, G. (2022). CRISPR-Cas9 engineering of *Lactococcus lactis* for enhanced nisin yield. *ACS Synthetic Biology*, 11(3), 1123–1135. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.1c00567>
- Liu, G., Nie, R., Liu, Y., Li, X., Duan, J., Hao, X., Shan, Y., & Zhang, J. (2022). *Bacillus subtilis* BS-15 Effectively Improves Plantaricin Production and the Regulatory Biosynthesis in *Lactiplantibacillus plantarum* RX-8. *Frontiers in microbiology*, 12, 772546. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.772546>
- Ljungh, A., Wadstrom, T. (Eds.). (2021). *Lactobacillus* Molecular Biology (4th ed.). Norfolk: Caister Academic Press. <https://doi.org/10.21775/9781913652619>
- Luesink, E. J. (1998). Transcriptional regulation of the las and gal operons in *Lactococcus lactis*. *Molecular Microbiology*, 30(4), 789–798. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.1998.01111.x>
- Mataragas, M. (2002). Characterization of two bacteriocins produced by *Leuconostoc mesenteroides* L124 and *Lactobacillus curvatus* L442, isolated from dry fermented sausages. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 18(9), 847–856. <https://doi.org/10.1023/A:1021239008582>
- Miao, J. (2015). Optimization of culture conditions for the production of antimicrobial substances by probiotic *Lactobacillus paracasei* subsp. *tolerans* FX-6. *Journal of Functional Foods*, 18, 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.07.011>
- Montville, T. J., Matthews, K. R. (2021). *Food Microbiology: An Introduction* (4th ed.). Washington: ASM Press. <https://doi.org/10.1128/9781555819974>
- Moreto, T. (2000). Production of sakacin P by *Lactobacillus sakei* in defined medium. *Journal of Applied Microbiology*, 88(3), 536–545. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2000.00994.x>
- Motta, A. S., & Brandelli, A. (2003). Influence of growth conditions on bacteriocin production by *Brevibacterium linens*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 62(2–3), 163–167. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1292-9>
- Mozzi, F. (2020). *Biotechnology of Lactic Acid Bacteria: Novel applications* (2nd ed.). Hoboken: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119593132>
- Nes, I. F. (2020). *Bacteriocins of Lactic Acid Bacteria: Microbiology, genetics and applications*. Hoboken: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119599819>
- Papagianni, M., & Sergelidis, D. (2013). Effects of the presence of the curing agent sodium nitrite on bacteriocin production by *Weissella paramesenteroides* DX. *Enzyme and Microbial Technology*, 53(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2013.04.003>
- Papagianni, M. (2007). Investigating the relationship between the specific glucose uptake rate and nisin production in cultures of *Lactococcus lactis*. *Enzyme and Microbial Technology*, 40(6), 1557–1563. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2006.10.035>
- Parente, E., & Hill, C. (1992). A comparison of factors affecting the production of two bacteriocins from lactic acid bacteria. *Journal of Applied Bacteriology*, 73(4), 290–298. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1992.tb04980.x>
- Parente, E., & Ricciardi, A. (1994). Influence of pH on the production of enterocin 1146 during batch fermentation. *Letters in Applied Microbiology*, 19(1), 12–15. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.1994.tb00891.x>
- Parente, E. (1994). Influence of pH on growth and bacteriocin production by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* 140Nwc. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 41(4), 388–389.
- Pattnaik, P. (2001). Purification and characterization of a bacteriocin-like compound (Lichenin) produced anaerobically by *Bacillus licheniformis*. *Journal of Applied Microbiology*, 91(4), 636–645. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2001.01429.x>
- Pattnaik, P. (2005). Effect of environmental factors on production of lichenin by *Bacillus licheniformis* 26L-10/3RA. *Microbiological Research*, 160(2), 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2005.01.006>
- Salminen, S. (2022). *Lactic Acid Bacteria: Microbiological and functional aspects* (5th ed.). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003049223>
- Savado, A. (2019). *Bacteriocins and food safety*. London: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02385-7>
- Schirru, S. (2014). Comparison of bacteriocins production from *Enterococcus faecium* strains in cheese whey and MRS medium. *Annals of Microbiology*, 64(1), 321–331. <https://doi.org/10.1007/s13213-013-0667-0>

- Settanni, L., & Corsetti, A. (2008). Application of bacteriocins in vegetable food biopreservation. *International Journal of Food Microbiology*, 121(2), 123–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.09.001>
- Shin, J. M., et al. (2021). Heterologous expression of bacteriocins using lactic acid bacteria. *Metabolic Engineering*, 67, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2021.05.007>
- Sidooski, T., Brandelli, A., Bertoli, S. L., Souza, C. K., & Carvalho, L. F. (2019). Physical and nutritional conditions for optimized production of bacteriocins by lactic acid bacteria — A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(17), 2839–2849. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1474852>
- Sonomoto, K., Yokota, A. (Eds.). (2021). *Lactic Acid Bacteria: Engineering and applications* (2nd ed.). Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6236-9>
- Stiles, M. E., & Holzapfel, W. H. (2022). *Lactic Acid Bacteria: Microbiological and functional aspects* (5th ed.). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003049223>
- Todorov, S. D. (2006). Effect of medium components on bacteriocin production by *Lactobacillus plantarum* strains ST23LD and ST341LD, isolated from spoiled olive brine. *Microbiological Research*, 161(2), 102–128. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2005.06.006>
- Todorov, S. D. (2010). Characterization of bacteriocins produced by two strains of *Lactobacillus plantarum* isolated from Beloura and Chourico, traditional pork products from Portugal. *Meat Science*, 84(3), 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.08.053>
- Vignolo, G. M. (2000). Influence of growth conditions on the production of lactocin 705 by *Lactobacillus casei* CRL 705. *Journal of Applied Bacteriology*, 78(1), 5–10. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1995.tb01665.x>
- Xu, Y., Yang, L., Li, P., & Gu, Q. (2019). Heterologous expression of Class IIb bacteriocin Plantaricin JK in *Lactococcus lactis*. *Protein Expression and Purification*, 159, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2019.02.013>
- Yang, R., & Ray, B. (1994). Factors influencing production of bacteriocins by lactic acid bacteria. *Food Microbiology*, 11(4), 281–291. <https://doi.org/10.1006/fmic.1994.1032>
- Yang, S. C. (2023). Next-generation bacteriocins: expanding the synthetic biology toolbox. *Nature Reviews Chemistry*, 7(2), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41570-022-00450-1>
- Zamfir, M. (2000). Production kinetics of acidophilin 801 by *Lactobacillus acidophilus* IBB 801. *FEMS Microbiology Letters*, 190(2), 305–308. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2000.tb09303.x>

ОБ АВТОРАХ

Соколов Илья Романович, аспирант кафедры биотехнологии и биоорганического синтеза, научный сотрудник лаборатории «Superfood технологии», ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» (125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4574-6853>, SPIN-код: 6492-2881, e-mail: radek.sokolov1@yandex.ru

Нсанова Виктория Максимовна, магистр кафедры биотехнологии и биоорганического синтеза, ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» (125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2008-5631>, e-mail: Adekemore@gmail.com

Виноградов Максим Владимирович, аспирант кафедры биотехнологии и биоорганического синтеза, ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» (125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8214-8569>, e-mail: maxvin-96@mail.ru

Каночкина Мария Сергеевна, к.т.н., доцент кафедры Биотехнологии и биоорганического синтеза ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» (125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6077-5957>, SPIN-код: 2584-6474, e-mail: kanoch@yandex.ru

AUTHOR INFORMATION

Sokolov Ilya Romanovich, Postgraduate Student of the Department of Biotechnology and Bioorganic Synthesis, Researcher at the Superfood Technologies Laboratory, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), (125080, Moscow, Volokolamskoye Highway, 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4574-6853>, SPIN-code: 6492-2881, e-mail: radek.sokolov1@yandex.ru

Nsanova Victoria Maksimovna, Master of the Department of Biotechnology and Bioorganic Synthesis, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) (125080, Moscow, Volokolamskoye Highway, 11), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2008-5631>, e-mail: Adekemore@gmail.com

Vinogradov Maxim Vladimirovich, Postgraduate Student of the Department of Biotechnology and Bioorganic Synthesis, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) (125080, Moscow, Volokolamskoye Highway, 11), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8214-8569>, e-mail: maxvin-96@mail.ru

Kanochkina Maria Sergeevna, Cand. Sci. (Eng.), associate Professor of the Department of Biotechnology and Bioorganic Synthesis, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) (125080, Moscow, Volokolamskoye Highway, 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6077-5957>, SPIN code: 2584-6474, e-mail: kanoch@yandex.ru

Молочная сыворотка в 3DP: обзор предметного поля

Е.И. Большакова¹, Наташа Поклар Ульрих²

¹ Всероссийский
научно-исследовательский
институт молочной
промышленности,
г. Москва, Российская
Федерация

² Университет Любляны,
Любляна, Республика Словения

АННОТАЦИЯ

Введение: Проблема утилизации молочной сыворотки остается актуальной, несмотря на развитие современных технологий переработки, таких как мембранные методы, биотехнологические подходы и консервирование. Глобальное производство сыворотки превышает 160 млн тонн в год и продолжает расти, что требует поиска новых решений в рамках концепции циркуляционной экономики. В последние годы технологии Индустрии 4.0, включая 3D-печать (3DP), привлекают внимание как перспективный инструмент для переработки побочных продуктов молочной промышленности. Однако адаптация сывороточных белковых продуктов для 3DP требует дополнительного изучения их свойств и методов модификации.

Целью настоящего обзора предметного поля стало изучение и анализ потенциала и текущего применения белковых продуктов переработки молочной сыворотки, как компонентов в составе чернил для 3DP.

Материалы и методы: Обзор выполнен в соответствии с руководством PRISMA-ScR. Поиск литературы проведен в ScienceDirect, Scopus и PubMed (2010–2025 гг.) с использованием целевых ключевых запросов. Для анализа структуры предметного поля использован VOSViewer.

Результаты: Анализ 56 отобранных источников показал, что сывороточные белковые компоненты (в 76% случаях WPI) активно исследуются в качестве ингредиентов для разработки 3DP чернил. Их потенциальное применение охватывает производство пищевых продуктов, включая функциональное и персонализированное питание (в том числе для людей с дисфагией), а также биомедицину, тканевую инженерию и химическую промышленность. Основное внимание исследователей в данном поле уделено изучению реологических, текстурных и микроструктурных характеристик разрабатываемых 3DP материалов, а также методов их модификации: изменения состава рецептур, технологической обработки до 3DP (регулирование pH, тепловая и механическая обработка) и после нее (сушка, карбонизация, СВЧ).

Выводы: Результаты обзора подтверждает перспективность применения сывороточных белков в составе материалов для 3DP. В качестве рекомендаций по развитию исследований в данном поле авторы предлагают уделить внимание систематизации накопленных знаний по ключевым компонентам в комбинации с сывороточными белками, прогностическому моделированию оптимальных комбинаций компонентов в рецептуре 3DP материалов, базируясь на их способности к межмолекулярным взаимодействиям и значимым свойствам, а также внедрению других сывороточных белковых ингредиентов, например гидролизатов, в активное использование для 3DP.

Ключевые слова: 3D-печать, молочная сыворотка, чернила для 3D-печати, свойства чернил для 3D печати

Корреспонденция:

Екатерина Ивановна
Большакова

E-mail:
ekaterina.bolshakova.ac@yandex.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 09.01.2025

Принята: 15.06.2025

Опубликована: 30.06.2025

Copyright: © 2025 Авторы



Для цитирования: Большакова, Е.И., & Поклар Ульрих, Н. (2025). Молочная сыворотка в 3DP: обзор предметного поля. *FOOD METAENGINEERING*, 3(2), 158–184.
<https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.88>

Whey in 3D Printing: A Scoping Review

Ekaterina I. Bolshakova¹, Natasha Poklar Ulrich²

¹ All-Russian Dairy Research
Institute, Moscow, Russian
Federation

² University of Ljubljana, Ljubljana,
Republic of Slovenia

ABSTRACT

Introduction: The issue of dairy whey utilization remains relevant despite advancements in modern processing technologies such as membrane methods, biotechnological approaches, and preservation. Global whey production exceeds 160 million tons annually and continues to grow, necessitating new solutions within the circular economy framework. In recent years, Industry 4.0 technologies, including 3D printing (3DP), have emerged as promising tools for processing dairy by-products. However, adapting whey protein products for 3DP requires further investigation of their properties and modification methods.

Purpose: This scoping review aimed to analyze the potential and current applications of whey protein products as components of 3DP inks.

Materials and Methods: The review was conducted following PRISMA-ScR guidelines. Literature searches were performed in ScienceDirect, Scopus, and PubMed (2010–2025) using targeted keywords. VOSViewer was employed for thematic analysis of the research field.

Results: Analysis of 56 selected sources revealed that whey protein components (76% of cases involving WPI) are actively studied as ingredients for 3DP inks. Their potential applications span food production, including functional and personalized nutrition (e.g., for individuals with dysphagia), as well as biomedicine, tissue engineering, and the chemical industry. Research primarily focuses on the rheological, textural, and microstructural characteristics of 3DP materials, alongside modification methods: adjusting ink composition, pre-3DP processing (pH regulation, thermal and mechanical treatment), and post-printing techniques (drying, carbonization, microwave treatment).

Conclusion: The review confirms the promise of whey proteins in 3DP materials. To advance research, the authors recommend systematizing knowledge on key components combined with whey proteins, predictive modeling of optimal formulations based on intermolecular interactions and functional properties, and integrating other whey-derived ingredients, such as hydrolysates, into 3DP applications.

Keywords: 3D printing, whey, 3D printing inks, 3D printing ink properties

Correspondence:

Ekaterina I. Bolshakova

E-mail:

ekaterina.bolshakova.ac@yandex.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 09.01.2025

Accepted: 15.06.2025

Published: 30.06.2025

Copyright: © 2025 The Authors



To cite: Bolshakova, E.I., Poklar Ulrich, N. (2025). Whey in 3D printing: A scoping review. *FOOD METAENGINEERING*, 3(2), 158–184. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.88>

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на существующие технологические решения, которые позволяют перерабатывать большие объемы вторичного продукта переработки сыра — сыворотки (использование мембранных технологий, методов консервирования, биотехнологических подходов и др.), постоянно растущее население и открытие новых предприятий оставляют проблему увеличения молочных отходов актуальной (Chourasia et al., 2022; Chaudhary et al., 2023). Согласно Sharma et al. (2018) мировое производство сыворотки превышает 160 млн тонн в год и ежегодно увеличивается на 1–2 %. Mohapatra et al. (2025) также подчеркивают проблему увеличения отходов молочной отрасли, сопутствующее ее масштабированию, и особое внимание в своей работе уделяют идее развития экономики замкнутого цикла, в рамках которой реальной становится реализация устойчивого управления побочными продуктами. В свою очередь, Hassoun et al. (2024) в контексте развития циркуляционной экономики в области пищевого производства и переработки отходов в качестве перспективных инструментов выделяют технологии Индустрии 4.0, в том числе и 3D печать (3DP). Таким образом, для предотвращения проблемы продовольственного кризиса при одновременном сохранении экологической безопасности необходимым является активное освоение современных технологий в аспекте переработки побочных продуктов молочной отрасли, в частности сыворотки.

Стратегия эффективного использования пищевых отходов является одной из ключевых задач всей перерабатывающей отрасли, в связи с чем исследователи по всему миру проводят работы по адаптации побочного сырья к 3DP (Carvajal-Mena et al., 2022; Uranga et al., 2024; Aït-Kaddour et al., 2024). Сложность использования пищевого, в том числе побочного, сырья заключается в том, что оно по своим свойствам зачастую не удовлетворяет требования к материалам для 3DP (Jeon et al., 2024). Ключевыми показателями, определяющими пригодность чернил для 3DP методом экструзии, который показал наибольшую адаптивность в пищевой промышленности согласно Carvajal-Mena et al. (2022), являются его реологические характеристики (вязкость, тиксотропность, модуль упругости, индекс консистенции и текучести и др.), а также его структурно-механические свойства (адгезия, эластичность, прочность). По данной причине ученые в данной области проводят дополнительные технологические операции (регу-

лирование pH, тепловую обработку, ультразвук и др.) для улучшения этих свойств (Daffner et al., 2021a; Maiz-Fernández et al., 2022; Gong et al., 2025), экспериментируют с компонентным составом чернил и параметрами печати (Feng et al., 2018; Thakur et al., 2023), которые также могут повлиять на конечный продукт. Повышенный интерес к технологии 3DP и ее синергии с пищевым сырьем обуславливают большое количество обзорных работ на эту тему, которые в основном структурированы по принципу: от потенциального применения к материалам для 3DP или от сырья для чернил к сферам их перспективного использования в объектах 3DP.

Ряд таких обзоров посвящен применению чернил с пищевыми компонентами в составе для 3DP с целью решения медицинских задач (Sun et al., 2022; Taneja et al., 2022; Gogoi et al., 2024; Ghobadi et al., 2025). Так, Sun et al. (2022) анализирует роль 3DP в регенерации кожных ран и спектр используемых для этого материалов (альгината, хитозана, желатина, полимолочной кислоты и др.), подчеркивая такие преимущества подхода, как персонализация под пациентов, скорость и простота изготовления, гибкость дизайна и др. Ghobadi et al. (2025) в аспекте заживления кожных ран выделяет для изучения чернила для 3D печати на основе хитозана, подчеркивая его исключительные свойства, а именно биоразлагаемость, нетоксичность и антимикробное действие. Taneja et al. (2022), Tamo et al. (2024), Gogoi et al. (2024) рассматривают гидрогели различного происхождения, в том числе натурального, в качестве перспективных чернил для 3DP в тканевой инженерии и изготовлении биокаркасов.

Группа других обзорных работ направлена на анализ текущего состояния применения 3DP в пищевой промышленности для производства продуктов питания, в том числе функциональных (Liu et al., 2017; Ma and Zhang, 2022; Y. Liu et al., 2024 и др.). Ma and Zhang (2022) изучают 3D печать как инструмент производства персонализированного питания и модификации органолептических свойств традиционных продуктов, а также предлагают алгоритм масштабирования производства персонализированных продуктов питания. Y. Liu et al. (2024) описывают основные свойства материалов, необходимые для 3DP, а также рассматривают широкий потенциал их применения в производстве детского, космического, специализированного питания, в том числе для людей с дисфагией. Последняя тема также являлась исследовательским вопросом обзорной работы Z. Liu et

al. (2024). Ранее Liu et al. (2017) систематизировали факторы, влияющие на точность и качество 3DP, которые в том числе зависят и от свойств конкретных материалов. Mu et al. (2021) акцентируют свое внимание на чернилах для 3DP на основе белков (коллагена, шелка, кератина; соевого, яичного, сывороточного белка и др.), обладающих биосовместимостью, что особенно важно в контексте применения в медицине и биоинженерии, а также высокой прочностью, особыми реологическими свойствами и способностью к управляемой молекулярной сборке, которые могут как положительно, так и отрицательно повлиять на готовый печатный продукт. Несмотря на тщательное описание ключевых технических аспектов 3DP и отдельный анализ применения кератина, фибриногена и др. белков авторы объединяют пищевые белки в одну группу, описывая их свойства в общем, однако каждый отдельный представитель этой группы обладает рядом уникальных характеристик, которые требуют индивидуального анализа в контексте их пригодности и использования для 3DP. Схожий подход к изучению данной темы в рамках рассмотрения группы объектов также был реализован Y. Wang et al. (2024) для белков, Feng et al. (2024) — для рекомбинированных пищевых гелей, Jeon et al. (2024) — для сырья животного происхождения. Подробного анализа использования сывороточных белковых компонентов (концентратов, изолятов, гидролизатов и др.) среди таких работ обнаружено не было, когда, например Rong et al. (2023), и Chen et al. (2024) осуществили это отдельно для крахмалов.

В связи с этим целью настоящего обзора предметного поля стало изучение и анализ потенциала и текущего применения белковых продуктов переработки молочной сыворотки, как компонентов в составе чернил для 3DP. Для реализации цели были поставлены следующие исследовательский вопросы:

- (1) Какие задачи, и с использованием каких методов, решают исследователи в данной области?
- (2) Какие белковые продукты переработки сыворотки используют в составе чернил для 3DP?
- (3) Как можно охарактеризовать поле применения чернил с сывороточными белковыми компонентами в составе?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Заявление о прозрачности и беспристрастности обзора

Представленный обзор предметного поля был выполнен в соответствии с руководством PRISMA-ScR (Tricco et al., 2018). Авторы подтверждают, что исследование соответствовало составленному протоколу и стратегии поиска, и все отклонения от него детально описаны в методологии.

Поисковые стратегии

Базы данных

Поиск осуществляли в двух базах данных ScienceDirect, Scopus и PubMed. Базы данных ScienceDirect и Scopus удовлетворяют ряду критериев оптимальности базы данных научных источников: достоверности публикаций, гарантированной рецензируемости источников, включенных в них; эффективности поиска посредством расширенных возможностей фильтров; широкому покрытию темы за счет фокуса баз данных на специализированных журналах по инженерии, биоматериалам и пищевым технологиям. PubMed в свою очередь позволит охватить область применения сыворотки в медицинском и биомедицинском аспектах. Сортировка статей при поиске была выставлена по релевантности. Временной диапазон поиска был ограничен 2010–2025 гг. Выбор начального предела диапазона (2010 г.) обусловлен несколькими причинами. Согласно Su and Al'Aref (2018), которые в своей работе описали историю 3DP, истечение срока действия патента на технологию послойного построения объектов компании Stratasys в 2005 году привело к запуску двух проектов, реализующих разработку и распространение дизайна доступного 3D принтера, а к 2010 разрабатываемые в этот период (2005–2010 гг.) модели и технологии были упрощены, в результате чего начался активный переход от узкого применения аддитивных технологий к разработке приложений в области медицины и пищевой промышленности. Для поиска работ, соответствующих концепции исследования были использованы следующие ключевые запросы:

1 — milk “whey” for “3D printing” / milk AND whey AND “3D printing”

2 — “whey” for “3D printing” “inks” / whey AND “3D printing” AND inks

Критерии включения и исключения источников

В обзор были включены эмпирические и обзорные научные статьи, а также главы книг или монографий. По географическому признаку ограничения установлены не были, но все публикации, включенные в исследование, были опубликованы на английском языке в полнотекстовом варианте. Включенные в обзор источники соответствовали исследовательским вопросам обзора и концепции исследования, которая, как и другие критерии подробно описана в Таблице 1.

Отклонения от протокола

После скрининга источников по первому запросу в процессе скрининга было зафиксировано дублирование информации, извлеченной из исследовательских статей в обзорных статьях, в связи с этим было принято решение дополнить условия исключения источников из обзора по критерию «Тип источников». Операторами

было принято решение рассматривать только исследовательские статьи, так как обзорные работы и главы из книг/монографий чаще всего дублируют информацию из уже включенных эмпирических работ или информация по исследуемому объекту не соответствует контексту и концепции.

Извлечение данных

Для первичного структурированного аннотирования по параметрам: страна аффилиации авторов, ссылка, год публикации, название работы, гипотеза исследования, основные задачи исследования, ключевые выводы и результаты исследования использовали искусственный интеллект (ИИ) ChatGPT-4o.

По результатам поиска было обнаружено 895 источников. В процессе идентификации первых 200 работ по запросу №1 в базе данных ScienceDirect было зафиксировано постепенное снижение их релевантности

Таблица 1

Критерии включения и исключения источников в обзор

Table 1

Inclusion and Exclusion Criteria for Sources in the Review

Критерий	Включение	Исключение	Обоснование
Контекст	Были включены исследования, описывающие использование сыворотки в 3DP, включая не только сыворотку как таковую, но и ее белковые компоненты, их обработку, преимущества и ограничения	Были исключены источники, не относящиеся к применению молочной сыворотки или ее белковых продуктов переработки в 3DP, а также источники, где сыворотка упоминается без связи с материалами для 3D-печати	Обеспечивает фокус на специфических аспектах применения молочной сыворотки в 3DP, исключая работы общего характера, которые не имеют практической ценности для анализа
Концепция	В обзор были включены работы, которые рассматривают сывороточные белковые компоненты как элементы состава чернил и оценивают их функциональность, свойства или ограничения в рамках применения	Исключены работы, которые не описывают молочную сыворотку или её продукты переработки как компоненты чернил для 3DP	Обеспечивает анализ только релевантных данных по ключевому объекту исследования — молочной сыворотке, как сырью для 3DP
Язык	Английский	Все языки кроме английского	Английский язык является основным языком научных публикаций и открывает доступ к наиболее актуальным исследованиям и международным данным
Типы источников	Обзорные и эмпирические статьи, главы книг и монографий	Исключены тезисы конференций, неопубликованные рукописи, научно-популярные статьи, патенты и материалы без рецензирования.	Исключение нерецензируемых источников позволяет избежать недостоверной информации
Статус публикаций	Опубликованные полнотекстовые варианты, доступные в сети Интернет	Все источники, полный текст которых не опубликован	Исключение недоступных полнотекстовых вариантов предотвращает искажение выводов из-за недостатка информации

относительно ключевого запроса, в связи с чем операторами было принято решение остановить анализ данного запроса и перейти к следующему. Таким образом, в процессе скрининга 604 источника по обоим запросам было исключено 552 источника, из которых 35 не имели полнотекстового варианта в открытом доступе, 32 оказались дубликатами, 207 не удовлетворяли условиям включения критериев «Концепция» и «Контекст», 1 источник не соответствовал критерию «Язык», 277 не соответствовали дополнительным введенным условиям по критерию «Тип источника» в результате отклонения от протокола. В процессе скрининга работ поиск по тексту ключевого слова «whey» позволил выявить 4 источника, соответствующих критериям отбора

в ссылках при сравнении данных в работах, которые сами этим критериям не отвечали. Эти 4 работы были дополнительно включены в обзор, тем самым общее число работ на этапе анализа полнотекстовых вариантов составило 56. Диаграмма отбора источников для обзора предметного поля по PRISMA-ScR представлена на Рисунке 1.

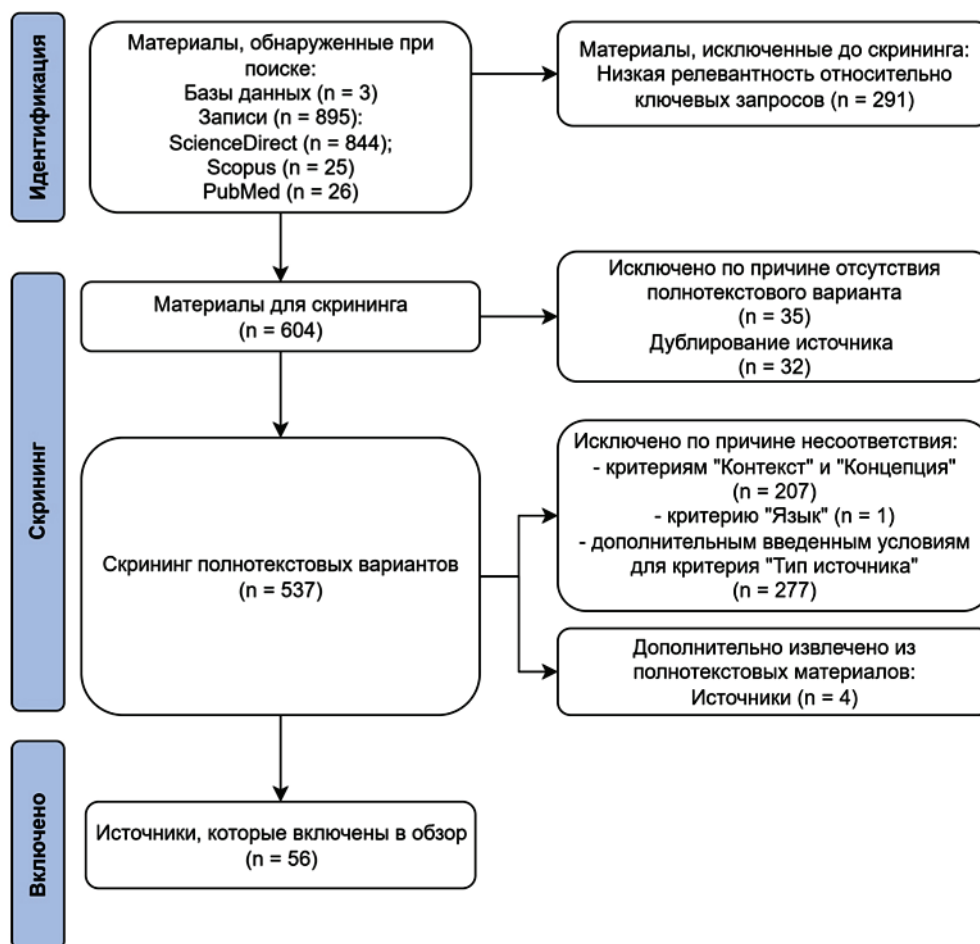
При анализе исключённых источников по критериям «Концепция» и «Контекст» было выявлено, что ряд работ лишь упоминали ЗДП как потенциальную область применения для гелей или других материалов. Однако в исследованиях не содержалось практических примеров, описания технологий или анализа опыта прямого использования ЗДП, что делало их нерелевантными

Рисунок 1

Диаграмма процесса отбора источников для обзора предметного поля по PRISMA-ScR

Figure 1

PRISMA-ScR Flow Diagram of the Source Selection Process for the Scoping Review



цели обзора. В некоторых статьях молочная сыворотка упоминалась лишь как пример для сравнения с другими материалами, но не являлась основным или одним из основных объектов исследования, что снижало их ценность для анализа специфических свойств сыворотки в контексте 3DP. Несмотря на значительное количество публикаций, описывающих использование других объектов в составе материалов для 3DP, дополнительные операции по внесению уточнений в ключевые запросы не проводились. Это связано с тем, что по первичному анализу было установлено: продукты переработки молочной сыворотки часто используются в комбинации с другими пищевыми материалами.

Визуализация

Все отобранные источники были экспортированы в формате ris и проанализированы с использованием программного обеспечения "VOSViewer," что позволило на основе библиографических данных визуализировать частоту и взаимосвязи ключевых слов, предоставляя наглядное представление структуры исследуемого

предметного поля. Порог минимального количества упоминаний ключевого слова был установлен на 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Описание отобранных источников

По результатам анализа 157 ключевых слов два или более двух раз встречалось 16 слов или словосочетаний. Их частота встречаемости представлена на Рисунке 2.

Согласно результатам анализа на рисунке 2 можно сделать вывод о том, что отобранные статьи для данного обзора по ключевым словам соответствуют его исследовательским вопросам. Основное внимание уделено изучению реологических свойств, текстуры, микроструктуры и применению сывороточных компонентов, таких как изолят сывороточных белков, в 3DP. Наиболее часто используемые материалы для 3DP представлены в виде эмульсионных гелей, эмульсий и эмульсий с высокой степенью насыщения внутренней фазы. Результаты анализа по хронологическому распределению источников представлены на Рисунке 3.

Рисунок 2

Частота встречаемости ключевых слов

Figure 2

Keyword Frequency Distribution

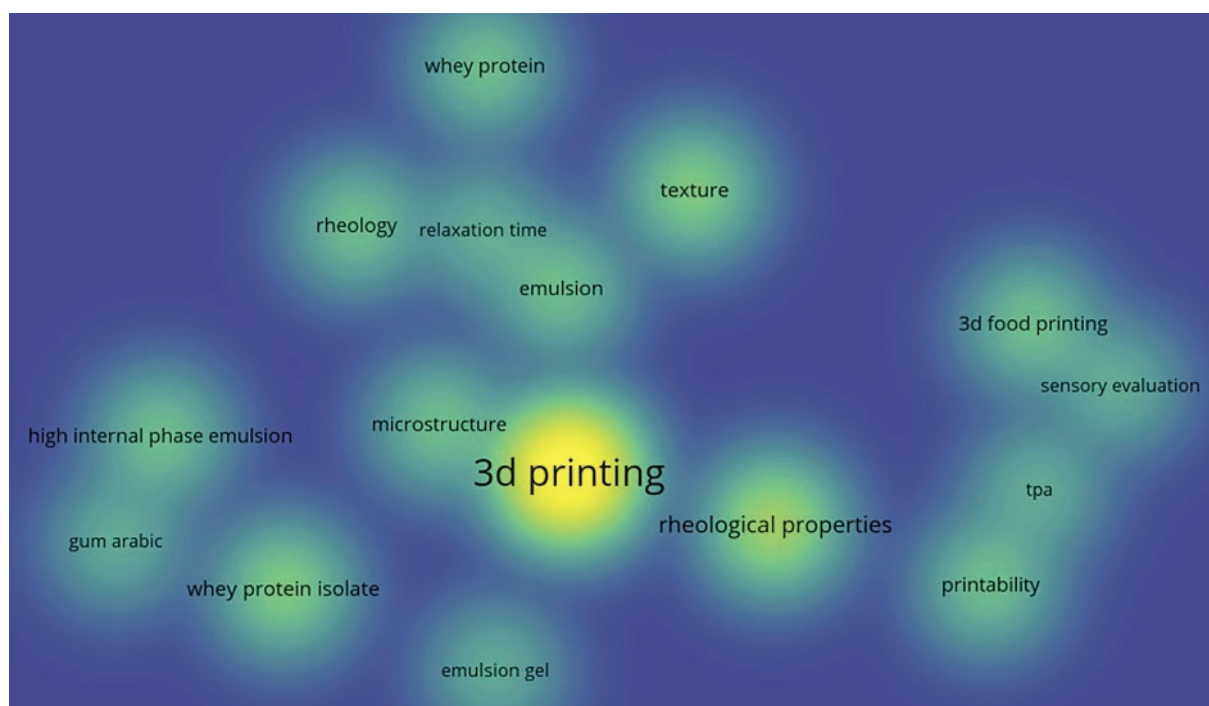
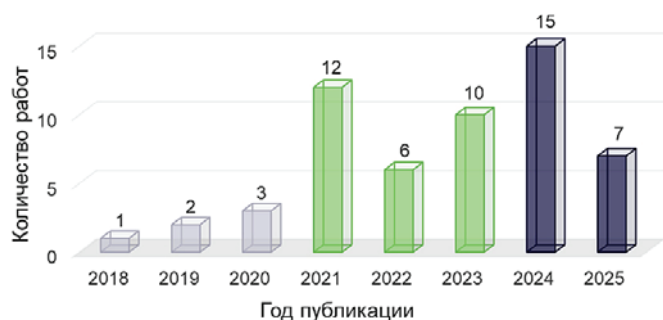


Рисунок 3

Хронологическое распределение отобранных источников

Figure 3

Chronological Distribution of Included Sources



Несмотря на то, что временной диапазон в данном обзоре составил 15 лет (с 2010 по 2025 год), источники, соответствующие критериям включения были обнаружены только в публикационный период с 2018

по 2025 гг. Отсутствие релевантных публикаций до 2018 года вероятно связано с тем, что в более ранний период фокус исследований по теме ЗДР был направлен на фундаментальные аспекты и не достаточно широко охватывал вопрос потенциала и перспективности использования вторичных сырьевых ресурсов, в том числе сывороточных белковых компонентов для производства чернил, используемых при создании 3D печатных объектов. Наибольшее количество работ, соответствующих исследовательским вопросам работы обнаружены в период с 2021 по 2024 гг., может быть обусловлен значительным развитием технологий аддитивного производства и увеличением их доступности в последние годы. Согласно данным UnivDatos¹, рынок 3D-печати оценивался примерно в 15,5 млрд долларов США в 2023 году и, как ожидается, будет расти с устойчивым среднегодовым темпом роста около 19,5% в течение прогнозируемого периода.

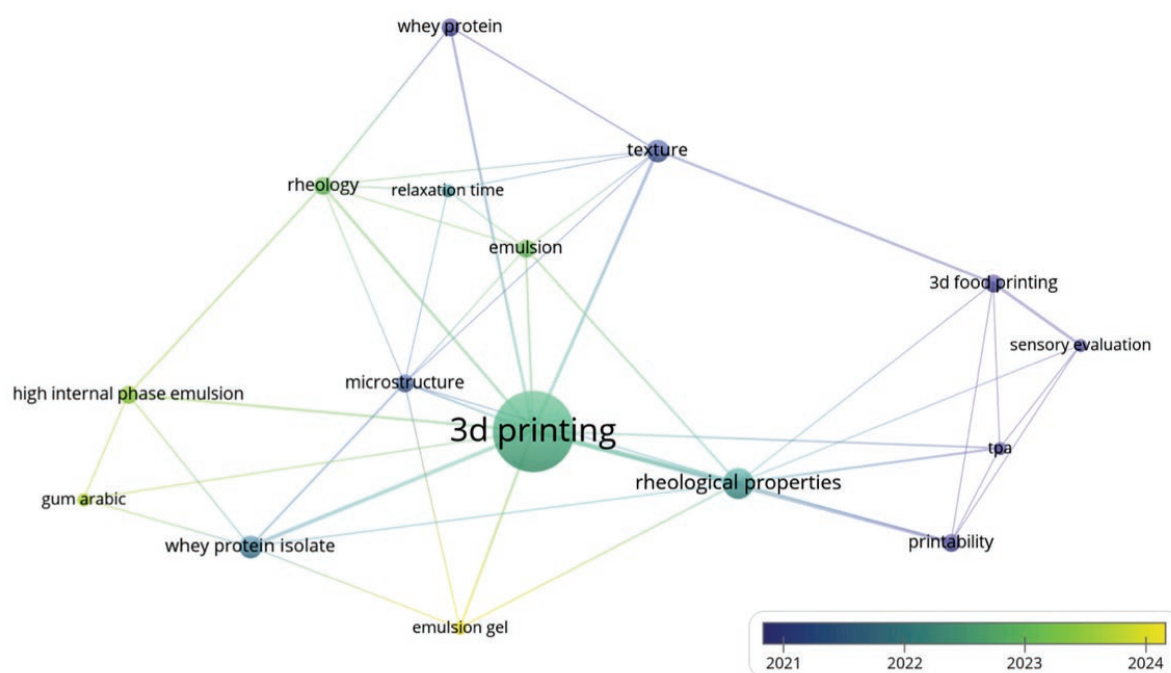
Карта взаимосвязи ключевых слов с учетом хронологии публикаций представлена на Рисунке 4.

Рисунок 4

Карта взаимосвязи ключевых слов с учетом хронологии публикаций

Figure 4

Keyword Co-occurrence Map with Chronological Overlay



¹ UnivDatos. (2023) 3D Printing Market: Current Analysis and Forecast (2024–2032) <https://univdatos.com/report/3d-printing-market/>

Состав и тип систем чернил для 3DP

Анализ отобранных источников позволил определить, что основной задачей в контексте использования продуктов переработки сыворотки в 3DP является разработка материалов с оптимальными печатными свойствами, и как следствие получение устойчивых и перспективных в применении напечатанных объектов. Несмотря на общую задачу в ряде исследований она достигается подбором компонентного состава рецептур, в том числе и концентраций (Shi et al., 2025; Liu et al., 2018), в других работах — воздействием различных технологических операций (регулирования pH, тепловой или механической обработки) на материал перед печатью (Daffner et al., 2021; Uribe-Alvarez et al., 2023) или пост-обработкой напечатанных объектов

(Llamas-Unzueta et al., 2022; Kamlow et al., 2021). Также эти подходы могут быть комбинированы. Однако, при разработке материала для 3DP ключевой задачей является выбор и обоснование компонентов рецептуры, поскольку от их физико-химических свойств зависит способность материала к межмолекулярным взаимодействиям, что напрямую влияет на структурные характеристики готовых изделий (Daffner et al., 2021a). В связи с этим первый этап анализа отобранных работ был направлен на обзор компонентного состава рецептур и типа разработанных систем (Таблица 2). Тип системы был определен на основании используемых терминов относительно материала для 3DP в работах исследователей.

Таблица 2

Компонентный состав и тип системы материалов для 3DP

Table 2

Component Composition and System Type of Materials Used for 3D Printing

Сывороточный компонент	Другие основные компоненты состава	Тип системы	Ссылка
Изолят сывороточного белка	Концентрат мицеллярного казеина, молочный жир	Суспензия	Daffner et al. (2021a)
	Льняное масло, каппа-каррагинан (0–0,8 %)	Эмульсия, эмульсионный гель	Shi et al. (2025)
	α-Лактоза моногидрат, деионизированная вода	НУ*	Fanghui Fan et al. (2022)
	Концентрат мицеллярного казеина, деминерализованная вода	Суспензия	Daffner et al. (2021b)
	Концентрат молочного белка, глицерин, ксантановая камедь	Паста	Liu et al. (2018)
	Греческий йогурт, желатин, подсластитель	Гель	Riantiningtyas et al. (2021)
	Мягкий сыр, полученный термокислотным способом, мальтитол,	Композитный полутвердый материал	Bareen et al. (2021), Bareen et al. (2023a), Bareen et al. (2023b)
	Каноловое масло, кукурузный крахмал, дистиллированная вода	Паста	Liu et al. (2021)
	Хлорид кальция, вода	Гель	Uribe-Alvarez et al. (2023)
	Подсолнечное масло, каппа-каррагинан	Эмульсионный гель	Kamlow et al. (2021)
	Гидроксипропилированный крахмал, каррагинан, кукурузное масло, сухое цельное молоко, целлюлоза, альгинат натрия	Эмульсия	Cai et al. (2022)
	Поливиниловый спирт, раствор глутарового альдегида, фосфатный буфер, сульфат гентамицина, гидроксиапатит	Композит	Tut et al. (2022)
	Молоко, соевое масло, неэмульгированный жидкий и кристаллический порошковый витамин Д3, казеинат натрия, азид натрия	Наноэмульсионный гель	Joshi et al. (2024)
	Картофельный крахмал, кукурузное масло, куркумин, ксантановая камедь	Эмульсионный гель	Cheng et al. (2024)

Продолжение Таблицы 2

Сывороточный компонент	Другие основные компоненты состава	Тип системы	Ссылка
	Желатин, взбитые сливки, пастеризованные яйца, сахар, лимонная кислота	Гель	Chow et al., (2021)
	Рисовый крахмал, соевое масло, ресвератрол, β-Каротин	Высокофазная эмульсия, гель	Zheng et al. (2024)
	Геллановая камедь	Гель	Oliveira et al. (2020)
	Пробиотик, эпигаллокатехин галлат, гидроксипропилированный крахмал, ресвератрол, цельное сухое молоко, целлюлоза, альгинат натрия, каррагинан, желатин, казеинат натрия и др.	Эмульсионный гель	Cai et al. (2023)
	Каппа-каррагинан, подсолнечное масло, коричный альдегид, хлорид калия, вода	Эмульсионный гель	Kamlow et al. (2022)
	Гуммиарабик, оливковое масло	Высокофазные** эмульсии, гель	Kan et al. (2023)
	Соевое масло	Высокофазные** эмульсии Пеккеринга, гель	Liu et al. (2019)
	Соевое масло, трансглутаминаза, хлорид натрия	Эмульсионный гель	Li et al. (2024)
	Концентрат пищевых волокон спаржи, масло	Эмульсионный гель	Lu et al. (2024)
	Соевое масло, фукоксантин, глицерил моностеарат	Высокофазные** эмульсии Пеккеринга, гель	Shang et al. (2023)
	Картофельный крахмал, ксантановая камедь, куркумин	Гель	Shen et al. (2023)
	Кукурузный крахмал	Гель	Xian et al. (2024)
	Гуммиарабик, натриевая соль альгиновой кислоты	Гидрогель	Kan et al. (2024)
	Сублимированные грибы Flammulina velutipes, оливковое масло, ксантановая камедь и др.	Эмульсионный гель	Dong et al. (2024)
	Порошок сублимированной красной капусты, сухой яблочный порошок, альгинат натрия, гуммиарабик	Гель	Ghazal et al. (2023)
	Мицеллярный казеин, соевый белковый изолят, гороховый белковый изолят, диоксид титана, графит, хитозан, казеинат натрия, подсолнечное масло и др.	Эмульсионный гель	W. Li et al. (2021)
	Мицеллярный казеин, микропартикулят сывороточного белка, взбитые сливки, хлорид натрия, вода	Эмульсионный гель	Sager et al. (2020)
	Гуаровая камедь, ксантановая камедь, гуммиарабик, короткоцепочечные триглицериды	Эмульсионный гель	Feng et al. (2025)
	Рибофлавин, ксантановая камедь	Паста	Araújo et al. (2025)
	Каппа-каррагинан, конжаковая камедь	Гель	Kong et al. (2025)
	В-каротин, гуаровая камедь, ксантановая камедь, гуммиарабик, камедь рожкового дерева	Эмульсионный гель	Li et al. (2023)
	Желатин, альгинат	Гидрогель	Sümbelli et al. (2021)
	Корневище лотоса	Композитный гель	Wang et al. (2025)
	Соевое масло, проантоцианидины, куркумин	Высокофазные** эмульсии Пеккеринга	Ji et al. (2025)
	Масло антарктического криля, карбоксиметилхитозан	Эмульсионный олеогель	Zhao et al. (2025)
	Метакриловый ангидрид	Гидрогель	Hu et al. (2022)
	Полисахаридный комплекс персиковой камеди, олигонуклеотиды с гидрофобными концевыми модификациями	Эмульсионный гель	R. Zhang et al. (2024)
Изолят сывороточного белка фибриллярной формы	Фруктоолигосахариды, геллановая камедь, глицерилтрибутерат, пробиотик	Композитный гидрогель	Zhang et al. (2024)
	Соевое масло, крахмалы, куркумин	Композитный эмульсионный гель	Z. Wang et al. (2024)
	Зеин, кукурузное масло, ликопин	Высокофазные** эмульсии Пеккеринга	Xia et al. (2024)

Окончание Таблицы 2

Сывороточный компонент	Другие основные компоненты состава	Тип системы	Ссылка
Концентрат сывороточного белка	Конжаковая мука, кюрдлан, бикарбонат натрия	Гель	Du et al. (2021)
	Подсолнечное масло, пчелиный воск, картофельный крахмал	Олеогель	Shi et al. (2021)
	Тыквенная мука, сухой шпинат, сорговая мука, сухой фиолетовый картофель, ксантановая камедь	Паста	Zheng et al. (2021)
	Казеинат кальция, высокофруктозный кукурузный сироп, масло (среднецепочечные триглицериды), глицерин, шоколад	Паста	Zhu et al. (2021)
	Биоразлагаемая полимолочная кислота (PLA)	Раствор	Kayadurmus et al. (2024)
Сухая сыворотка	Вода	Паста	Llamas-Unzueta et al. (2022), Llamas-Unzueta et al. (2024)
Бета-лактоглобулин	Желатин, альгинат натрия, гидрохлорид допамина и др.	Гель	Ghorbani et al. (2024)
Лактоферрин	Пектин, каппа-каррагинан, куркумин, подсолнечное масло, β-каротин, масло (среднецепочечные триглицериды), овсяный β-глюкан, хитозан, эпигаллокатехин галлат	Высокофазные** эмульсии, гидрогели	Xu et al. (2023)
	Поликапролактон, изолят сывороточного белка (WPI)	Порошковая смесь	Hewitt et al. (2019)

Примечание. *НУ — не уточнено в источнике. **Эмульсия с высокой степенью насыщения внутренней фазы
Note. * Not specified — no information provided in the source. ** High internal phase emulsion — emulsion system with a high volume fraction of internal phase

Тип систем для экструзионной 3DP ограничен тем, что для прохождения чернил через сопло они должны обладать особыми реологическими свойствами, обеспечивающими баланс между текучестью и способностью сохранять форму после экструзии (Hussain et al., 2021). Это означает, что материал должен демонстрировать сдвиговое разжижение (становиться менее вязким при приложении напряжения) и достаточную структурную стабильность после нанесения слоя. При обзоре литературы были выявлены различные типы систем, используемых для 3DP, включая суспензии, эмульсионные гели, гидрогели, пасты и композитные системы. На этапе разработки чернил используемый материал мог находиться в виде эмульсии или суспензии (Daffner et al., 2021a; Shi et al., 2025 и др.), после чего технологическая обработка (регулирование pH и тепловая обработка) способствовала переходу в более структурированное состояние (в основном в гель), обеспечивая необходимую вязкость и механическую прочность для печати.

Вне зависимости от типа систем выявлено, что в 76 % изученных работ исследователи в качестве сывороточного компонента использовали изолят сывороточных белков (WPI), еще в 5 % также был использован WPI, однако он находился в фибриллярной форме, в 9 % применяли концентраты сывороточных белков, в 4 % — сухую сыворотку и лишь в 2 % и 4 % — отдельные сывороточные белки (бета-лактоглобулин и лактоферрин, соответственно). Превалирование WPI в ре-

цептурах может быть обусловлено рядом преимуществ этой формы сывороточных белков, которые отмечают авторы, а именно: высокая пищевая ценность, эмульгирующая способность, легкая усвояемость и биодоступность, биосовместимость, а также потенциал к образованию гелей (Sager et al., 2020; Tut et al., 2022; Cai et al., 2023; Riantiningtyas et al., 2024; Shi et al., 2025). В работах Daffner et al. (2021b), Bareen et al. (2021) при добавлении WPI в рецептуру с казеин-содержащим компонентом (концентрата молочного белка, обезжиренное молоко) отмечена стабилизация гелей за счет образования дисульфидных связей, что впоследствии улучшало механическую прочность напечатанных объектов. Аналогичный эффект обнаружен в работе Dong et al. (2024), где авторы сравнивали WPI с концентратами растительных белков, для которых образование дисульфидных связей недоступно. В свою очередь, в исследованиях Riantiningtyas et al. (2024), Liu et al. (2018) WPI использовали для уменьшения вязкости и ослабления текстуры геля, что на первый взгляд может казаться недостатком, но на самом деле облегчает экструзию геля через узкое сопло 3D принтера. Эти примеры указывают на уникальность WPI, так как в зависимости от состава рецептуры он может играть различную роль. Так, функцию эмульгатора WPI выполнял в работах Liu et al. (2021), Kamlow et al. (2021), Kamlow et al. (2022), Cai et al. (2022), Joshi et al. (2024), Zheng et al., (2024), Lu et al. (2024); функцию стабилизатора в исследованиях Oliveira et al. (2020), Liu et al. (2019), Shang et al. (2023) и др.

Однако помимо положительных эффектов применения WPI рядом ученых были отмечены и негативные проявления внесения компонента в рецептуру или увеличения его концентрации в ней, а именно недостаточная стабильность (Sager et al., 2020), риск потери упругости (Liu et al., 2018), ухудшение текстурных свойств (Liu et al., 2021), неспособность заполнять междисперсные пустоты (Li et al., 2021), низкая влагоудерживающая способность (Dong et al., 2024), низкая способность к поддержанию формы сложной архитектуры (Xian et al., 2024).

Учитывая ограничения WPI ученые используют различные способы для регулирования его свойств и получения конкурентноспособных чернил для 3DP. Структурой и устойчивостью гелей с WPI можно управлять внесением дополнительных добавок, например полисахаридов (ксантановой, гуаровой, геланновой камеди, гуммиарабика, каррагинана и др.), которые активно используются в работах данного поля (Liu et al. 2018; Kamlow et al., 2022; Shen et al., 2023; Cheng et al., 2024 и др.). Реакция Майяра между сывороточными белками и полисахаридами является одним из механизмов стабилизации геля согласно Kan et al. (2023). В свою очередь, в исследовании Li et al. (2024) было продемонстрировано, что добавление трансглутаминазы в состав геля на основе WPI и соевого масла значительно улучшило экструдруемость материала через сопло 3D-принтера. Это было достигнуто за счет повышения упорядоченности структуры геля и оптимизации распределения воды в гелевой сети. Согласно авторам трансглутаминаза может значительно повысить точность 3DP.

Другими рецептурными решениями для улучшения свойств гелей являлись внесение молочной жировой фракции в работы Sager et al. (2020), и Daffner et al. (2021a), получение фибриллярной формы WPI и использование ее в составе у Xia et al. (2024), и Z. Wang et al. (2024). Sager et al. (2020) в свою очередь также дополнительно к WPI использовали микропартикулят сывороточных белков, который не участвовал в образовании связей и вел себя как инертный наполнитель в гелевой сети.

Помимо подбора различных рецептов для управления свойствами 3DP чернил существуют и другие технологические подходы. Так, Hewitt et al. (2019) использовал другую технологию печати MEW, которая позволяет создавать 3D структуры путем нанесения расплавленных полимерных волокон на субстрат с помощью электрического поля. Данная техника позволила получить

высокопористый 3DP материал с четкой формой пор и улучшенной биоактивностью (Hewitt et al., 2019).

Другие технологические операции, а именно регулирование pH, тепловая или ультразвуковая обработка, гомогенизация высокого давления также были применены для изменения свойств 3DP материалов и 3DP объектов (Daffner et al., 2021a, 2021b; Du et al., 2021; W. Li et al., 2021; Z. Wang et al., 2024; Shi et al., 2025). В работе Sümbelli et al. (2020) для разработки гидрогелей на основе белка исследователи использовали фотохимический метод сшивания белков *in situ* ANADOLUCA. Так как данный метод реализуется в мягких условиях без агрессивных химических реагентов, он позволил исследователям получить нетоксичные гели на основе WPI с улучшенной стабильностью и выживаемостью клеток (Sümbelli et al., 2020).

Ключевой задачей тепловой обработки и регулирования pH являлось управление состоянием белка, а именно инициация его денатурации, взаимодействия с другими компонентами и образование комплексов. Механическая обработка в основном была направлена на получение однородной смеси и предотвращения осаждения компонентов или на уменьшение размера жировых частиц, увеличение их площади поверхности и формирования эмульсий — при содержании жировой составляющей. В качестве пост-обработки исследователи применяли карбонизацию (Llamas-Unzueta et al., 2022; Llamas-Unzueta et al., 2024) и сушку различными способами: микроволнами, инфракрасным излучением и горячим воздухом (Shen et al., 2023) для стабилизации напечатанных объектов, а также СВЧ обработку для модификации органолептических свойств (Ghazal et al., 2023). Несмотря на то, что исследователи использовали разные подходы к улучшению свойств 3DP-материалов, в большинстве работ анализу подвергался схожий набор ключевых характеристик с использованием общих методологических подходов.

Свойства материалов для 3DP и методы их анализа

Каждый из исследуемых в работах показателей отвечает конкретной задаче в аспекте определения пригодности материала для 3DP и может быть изучен несколькими методами (Таблица 3).

Таблица 3

Исследуемые свойства и используемые методы для анализа 3DP чернил и объектов

Table 3

Analyzed Properties and Methods Used for Characterization of 3DP Inks and Printed Constructs

Исследуемые параметры и свойства	Метод, оборудование	Ссылка
<i>Реология</i>		
Модуль накопления (G'), модуль потерь (G''), предел текучести и/или др. реологические тесты	Реометрия, Kinexus Pro, DHR, HAAKE, Discovery HR-3, MCR и др.	Daffner et al. (2021a), Daffner et al. (2021b), Du et al. (2021), Z. Wang et al. (2024), Shi et al. (2025), Fan et al. (2022), Liu et al. (2018), Riantiningtyas et al. (2021), Shi et al. (2021), Xia et al. (2024), Bareen et al. (2021), Bareen et al. (2023a), Bareen et al. (2023b), Liu et al. (2021), Uribe-Alvarez et al. (2023), Kamlow et al. (2021), Joshi et al. (2024), Llamas-Unzueta et al. (2022), Cheng et al. (2024), Chow et al., (2021), Zheng et al. (2024), Oliveira et al. (2020), Zheng et al. (2021), Liu et al. (2019), Kan et al. (2023), Li et al. (2024), Lu et al. (2024), Shang et al. (2023), Shen et al. (2023), Xian et al. (2024), Dong et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Li et al. (2021), Sager et al. (2020), Araújo et al. (2025), Kong et al. (2025), Li et al. (2023), Sümbelli et al. (2021), Wang et al. (2025), Ji et al. (2025), Zhao et al. (2025), Hu et al. (2022), R. Zhang et al. (2024)
Температура перехода из раствора в гель ($T_{sol-gel}$)*	Реометрия, Kinexus Pro	Daffner et al. (2021a); Daffner et al. (2021b)
Вязкость	Реометрия, Kinexus Pro, DHR, HAAKE, Discovery HR-3, MCR и др.	Shi et al. (2025), Fan et al. (2022), Liu et al. (2018), (Bareen et al. (2021), Bareen et al. (2023a), Liu et al. (2021), Bareen et al. (2023b), Llamas-Unzueta et al. (2022), Chow et al., (2021), Oliveira et al. (2020), Liu et al. (2019), Kan et al. (2023), Shang et al. (2023), Shen et al. (2023), Dong et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Xu et al. (2023), R. Zhang et al. (2024)
Тиксотропия	Реометрия, DHR, HAAKE, MCR	Shi et al. (2025), Zheng et al. (2024), Liu et al. (2019), Shang et al. (2023), Xian et al. (2024)
Псевдопластичность	Реометрия, MCR	Joshi et al. (2024)
Поведение при ползучести и степень восстановления	Реометрия, DHR, MCR	Riantiningtyas et al. (2021), Bareen et al. (2023a), Zheng et al. (2024), Sager et al. (2020)
Индекс восстановления	Реометрия, MCR	Bareen et al. (2021)
Время релаксации	Реометрия, HAAKE	Fan et al. (2022)
	Низкопольный ядерный магнитный резонанс MesoMR23–060H	Zhang et al. (2024), Shang et al. (2023)
Экструзируемость	Измерение механической силы, универсальная испытательная машина Zwick Roell Z010 с 50-Н нагрузочной ячейкой	Uribe-Alvarez et al. (2023)
<i>Текстурный профиль</i>		
Текстурные свойства (прочность геля, твердость, хрусткость, адгезивность, упругость и пр.)	Текстурный анализ, TA-XT, TA-XTC, Texture Pro и др.	Shi et al. (2025), Fan et al. (2022), Liu et al. (2018), Z. Wang et al. (2024), Riantiningtyas et al. (2021), Shi et al. (2021), Bareen et al. (2021), Bareen et al. (2023a), Liu et al. (2021), Uribe-Alvarez et al. (2023), Kamlow et al. (2021), Cheng et al. (2024), Chow et al., (2021), Zheng et al. (2021), Zhu et al. (2021), Kamlow et al. (2022), Liu et al. (2019), Zhang et al. (2024), Kan et al. (2023), Li et al. (2024), Xian et al. (2024), Kan et al. (2024), Dong et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Xu et al. (2023), Sager et al. (2020), Feng et al. (2025), Kong et al. (2025), Li et al. (2023), Wang et al. (2025), Zhao et al. (2025)

Продолжение Таблицы 3

Исследуемые параметры и свойства	Метод, оборудование	Ссылка
<i>Характеристика частиц и их взаимодействий</i>		
Дзета (ζ)-потенциал и/или размер частиц (в т.ч. капель), индекс полидисперсности	Метод лазерного динамического светорассеяния Malvern Mastersizer, Zetasizer SYNC	Daffner et al. (2021a), Daffner et al. (2021b), Bareen et al. (2023b), Joshi et al. (2024), Zheng et al. (2024), Shi et al. (2025), Cai et al. (2023), Kamlow et al. (2022), Liu et al. (2019), Zhang et al. (2024), Kan et al. (2023), Li et al. (2024), Shang et al. (2023), Kan et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Xu et al. (2023), W. Li et al. (2021), Feng et al. (2025), Araújo et al. (2025), Ji et al. (2025), R. Zhang et al. (2024)
	Спектроскопия ядерного магнитного резонанса	Kamlow et al. (2022)
	Анализ изображения капель, полученных при помощи световой микроскопии, с использованием ПО Nano Measurer	Zhao et al. (2025)
Анализ взаимодействий между компонентами	ИК-Фурье спектроскопия, Nicolet iS50, Jasco, FT-IR и др.	Shi et al. (2025), Tut et al. (2022), Cheng et al. (2024), Ghorbani et al. (2024), Zheng et al. (2024), Li et al. (2024), Shang et al. (2023), Shen et al. (2023), Kan et al. (2024), Dong et al. (2024), Feng et al. (2025), Kayadurmus et al. (2024), Wang et al. (2025), Hu et al. (2022), R. Zhang et al. (2024)
	Спектроскопия кругового дихроизма	Shang et al. (2023), Hu et al. (2022)
	Спектроскопия ядерного магнитного резонанса	Hu et al. (2022)
	Спектрофотометрический анализ гидрофобности поверхности с помощью связывания бромфенолового синего при 25°C, длина волны 596 нм	Wang et al. (2025)
	Анализ межмолекулярных сил: растворимость белка в селективных денатурах (NaCl, мочевины, β -меркаптоэтанол) для определения вклада ионных, водородных, гидрофобных и дисульфидных взаимодействий	Wang et al. (2025)
Межфазные свойства (межфазное натяжение масло-вода, поверхностное натяжение газ-жидкость и т. д.)	Оптический измеритель угла контакта и устройство для осциллирующей капли	Shi et al. (2025), Zheng et al. (2024), Shang et al. (2023)
	Измерение трехфазного угла смачивания с помощью анализатора формы капли DSA-30 и измерение поверхностного натяжения газа и жидкости\межфазного натяжения масла и воды с использованием пластины Вильгельми	Ji et al. (2025)
	ВСА-тест для определения скорости адсорбции белка и поверхностной плотности на границе раздела масло-вода	Ji et al. (2025)
Микроструктура	Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, Leica, Olympus, Zeiss и др.	Daffner et al. (2021a), Shi et al. (2025), Liu et al. (2018), Xia et al. (2024), Bareen et al. (2023a), Kamlow et al. (2021), Chow et al. (2021), Zheng et al. (2024), Oliveira et al. (2020), Zhang et al. (2024), Kan et al. (2023), Li et al. (2024), Lu et al. (2024), Shang et al. (2023), Kan et al. (2024), Feng et al. (2025), Ji et al. (2025)
	Криогенная трансмиссионная микроскопия, Tecnai G2 F30 (200 кВ) с CETA CMOS детектором	Daffner et al. (2021a)
	Трансмиссионная электронная микроскопия	Zhang et al. (2024), Kan et al. (2024)
	Крио-сканирующая электронная микроскопия, Hitachi, Magellan и др.	Shi et al. (2025), Cheng et al. (2024), Zheng et al. (2024), Li et al. (2024), Lu et al. (2024)

Продолжение Таблицы 3

Исследуемые параметры и свойства	Метод, оборудование	Ссылка
	Сканирующая электронная микроскопия (в т.ч. полевая эмиссионная), Phenom Pro, Zeiss и др.	Z. Wang et al. (2024), Bareen et al. (2021), Tut et al. (2022), Bareen et al. (2023b), Joshi et al. (2024), Llamas-Unzueta et al. (2022), Ghorbani et al. (2024), Liu et al. (2018), Liu et al. (2019), Shang et al. (2023), Kan et al. (2024), Dong et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Hewitt et al. (2019), Kayadurmus et al. (2024), Sümbelli et al. (2021), Wang et al. (2025), Ji et al. (2025), Hu et al. (2022)
	Флуоресцентная микроскопия, Axio Vert A1 и др.	Du et al. (2021), Shi et al. (2021), Shang et al. (2023), Ghazal et al. (2023), Hewitt et al. (2019), Ji et al. (2025), R. Zhang et al. (2024)
	Оптическая микроскопия Leica, Olympus и др.	Xia et al. (2024), Kan et al. (2023), Xian et al. (2024), Kan et al. (2024), W. Li et al. (2021), Ji et al. (2025)
	Световая микроскопия	Zhao et al. (2025)
	Рентгеновская дифракция	Tut et al. (2022), Joshi et al. (2024), Dong et al. (2024)
	Микроскопия в поляризованном свете	Cai et al. (2023)
	Лазерная конфокальная Рамановская спектроскопия	Wang et al. (2025)
Белковый состав	Электрофорез в полиакриламидном геле с додецилсульфатом (SDS-PAGE)	Daffner et al. (2021a), Daffner et al. (2021b), Kan et al. (2024)
Влагоудерживающая способность	Центрифугирование и расчет по формуле	Shi et al. (2025), Z. Wang et al. (2024), Dong et al. (2024), Kong et al. (2025), Li et al. (2023)
Маслоудерживающая способность	Центрифугирование и расчет по формуле	Zheng et al. (2024), Zhao et al. (2025)
Распределение влаги	Магнитно-резонансная томография, MesoMR23–060H-I	Shi et al. (2025)
	Низкопольный ядерный магнитный резонанс, MicroMR20–030V-I, PQ001 и др.	Du et al. (2021), Liu et al. (2018), Zheng et al. (2021), Li et al. (2024), Shen et al. (2023), Dong et al. (2024), Kong et al. (2025), Li et al. (2023), Wang et al. (2025)
Теплофизические свойства (температура стеклования, температура плавления, температура кристаллизации, температура гелеобразования)	Дифференциальная сканирующая калориметрия	Fan et al. (2022), Shi et al. (2021), Kamlow et al. (2021), Tut et al. (2022), Zheng et al. (2024), Li et al. (2024)
	Термогравиметрический анализ от 20 до 600 °C со скоростью 10 °C/мин в атмосфере азота с регистрацией кривых	Wang et al. (2025)
Пористость, и/или размер пор, и/или размер ребер жесткости	Адсорбция/десорбция азота при низких температурах, BELSORP-MR6	Fan et al. (2022)
	Анализ SEM-изображений с использованием или без использования ImageJ (плагин ND) и DiameterJ	Hewitt et al. (2019). Kayadurmus et al. (2024)
	Вторичное проникновение ртути, порозиметр	Llamas-Unzueta et al. (2022)
<i>Стабильность ЗДР материалов и ЗДР объектов</i>		
Стабильность при хранении	Хранение при 4 °C в течение 90 дней; визуальная оценка	Shi et al. (2025)
	Хранение при 4 °C в течение 30 дней; визуальная оценка	Xia et al. (2024)
	Хранение при 25°C 14 дней	Shang et al. (2023)
	Хранение при 25°C 1 год	Xu et al. (2023)
	Хранение при температуре 4 °C в течение 7 дней, фотографирование	Ji et al. (2025)
	Тест на набухание и/или деградацию	Tut et al. (2022), Ghorbani et al. (2024),Feng et al. (2025), Hewitt et al. (2019), Kayadurmus et al. (2024), Sümbelli et al. (2021)
	Анализ биоразложения с помощью набора для анализа белков Qubit®; высвобождение белка отслеживалось в течение 21 дня и выражалось в процентах от добавленного белка	Hewitt et al. (2019)

Продолжение Таблицы 3

Исследуемые параметры и свойства	Метод, оборудование	Ссылка
Свойства жидкости в материалах	Тест на синерезис, измерения и вычисления	Kamlow et al. (2022)
	Тест на потерю воды, измерения и вычисления	Xian et al. (2024)
Оценка устойчивости	Оценка влияния концентрации соли на стабильность гелей и их микроструктуру	Shang et al. (2023)
Устойчивость к окислению	Определение перекисного числа (POV) для продуктов первичного окисления липидов и анализ TBARS для определения продуктов вторичного окисления липидов (эквиваленты малонового диальдегида)	Ji et al. (2025), Zhao et al. (2025)
Термоустойчивость/Свойства пастеризации	Нагревание при 90°C в водяной бане 30 минут, визуальная оценка, температурное сканирование; HAAKE MARS60, Thermo Fisher	Shi et al. (2025)
	Нагревание при 75°C в течение 30 минут и охлаждение до 25°C в ледяной бане, визуальная оценка	Xia et al. (2024)
	Нагревание от комнатной температуры до 800 °C со скоростью 20 °C/мин в азотной атмосфере с использованием TGA550 (TA Instruments, США)	Feng et al. (2025)
	Нагревание от 50 °C до 95 °C со скоростью 12 °C/мин, выдержка 2,5 мин, затем охлаждение до 50 °C с той же скоростью с использованием анализатора RVA-Super; регистрация параметров вязкости	Wang et al. (2025)
Стабильность при замораживании и оттаивании, характер оттаивания	Замораживание при –20 °C на 24 ч, оттаивание при 25 °C в течение 2 ч; визуальная оценка,	Shi et al. (2025)
	Замораживание при –20 °C на 18 ч, оттаивание при 20 °C в течение 6 ч; визуальная оценка	Xia et al. (2024)
	Замораживание при –20 °C на 4 ч, оттаивание при 25 °C в течение 6 ч; оценка микроструктуры и времени релаксации	Shang et al. (2023)
	Дифференциальная сканирующая калориметрия, Pyris Diamond	Liu et al. (2019)
Стабильность при центрифугировании	Визуальная и расчетная оценка после центрифугирования	Xia et al. (2024), Lu et al. (2024), Ji et al. (2025)
Жесткость (модуль накопления E')	Динамическо-механический анализатор, Mettler-Toledo	Fan et al. (2022)
Устойчивость к механической нагрузке (модуль потерь E'')	Динамическо-механический анализатор, Mettler-Toledo	Fan et al. (2022)
Точность печати и/или геометрические физические характеристики	Визуальная оценка, фотографирование и анализ, и/или численные измерения	Z. Wang et al. (2024), Uribe-Alvarez et al. (2023), Riantiningtyas et al. (2021), Bareen et al. (2023b), Joshi et al. (2024), Chow et al., (2021), Zheng et al. (2021), Lu et al. (2024), Araújo et al. (2025), Kong et al. (2025), Li et al. (2023), Wang et al. (2025)
Индекс стабильности Turbiscan (TSI)	Анализ с использованием Turbiscan и расчеты	Feng et al. (2025), Zhao et al. (2025), R. Zhang et al. (2024)
<i>Другие специфические методы</i>		
Механические свойства (прочность, сжимаемость)	Испытание на сжатие, SHIMADZU EZ-LX, Instron Model 8562 и др.	Tut et al. (2022), Llamas-Unzueta et al. (2022), Kayadurmus et al. (2024), Sümbelli et al. (2021), Hu et al. (2022)
	Измерение крутящего момента до разрушения	Llamas-Unzueta et al. (2024)

Окончание Таблицы 3

Исследуемые параметры и свойства	Метод, оборудование	Ссылка
Эффективность инкапсуляции и стабильности веществ	Српектрофотометрия и расчеты, Lambda 35 UV-VIS, TU-1810PC и др.	Tut et al. (2022), Joshi et al. (2024), Cheng et al. (2024), Zheng et al. (2024), Shang et al. (2023), Shen et al. (2023), Araújo et al. (2025), Kayadurmus et al. (2024), Li et al. (2023), Ji et al. (2025), Ji et al. (2025)
	Посевной метод для пробиотиков, ВЭЖХ для эпигаллокатехин галлата	Cai et al. (2023)
Эффективность высвобождения лекарственного средства	Српектрофотометрия, Lambda 35 UV-VIS	Tut et al. (2022)
Выживаемость клеток	Посевной и пластинчатый метод с серийными разведениями	Cai et al. (2023)
Высвобождение биоактивных веществ	Система имитации пищеварения с автоматическим титратором, инкубатором и пр.	Cai et al. (2023), Shang et al. (2023), Feng et al. (2025)
	In vitro переваривание, центрифугирование и флуоресцентная спектроскопия для определения биодоступности Rb (%)	Araújo et al. (2025)
	Центрифугирование кишечного содержимого для выделения мицеллярной фазы, экстракция метанолом/МТБЭ и количественное определение АСТ для расчета биодоступности (%).	Zhao et al. (2025)
Переваримость	In vitro переваривание с расчетом степени гидролиза или без него	Feng et al. (2025), Araújo et al. (2025), Zhao et al. (2025)
Взаимодействие с живыми клетками (адгезия клеток, жизнеспособность и морфология)	Колориметрический MTT-тест и сканирующая электронная микроскопия	Tut et al. (2022), Hewitt et al. (2019), Araújo et al. (2025)
	Оценка жизнеспособности клеток с использованием Calcein AM, EthD-1 и флуоресцентной микроскопии на 1,3 и 7 сутки	Kayadurmus et al. (2024)
	Оценка клеточной пролиферации с использованием PrestoBlue, анализ ALP	Ghorbani et al. (2024)
Цитотоксичность	MTT тест	Kayadurmus et al. (2024)
	ССК-8 тест	Hu et al. (2022)
Способность к заживлению ран	Исследование заживления ран in vitro (тест на царапины); HaCaT, Nhdf и совместная культура; ширина раны измерялась через 0 и 24 часа с помощью программного обеспечения CellSens (Leica DM IL)	Hewitt et al. (2019)
Элементный состав	Анализатор LECO	Llamas-Unzueta et al. (2022), Llamas-Unzueta et al. (2024)
Содержание минералов в золе	Элементный анализ с использованием рентген флуоресцентной спектроскопии, Bruker	Llamas-Unzueta et al. (2022)
Растворимость белка	Растворимость белков в растворах, нарушающих специфические взаимодействия (электростатические, водородные, гидрофобные, дисульфидные), для определения их вклада в структуру образца	Li et al. (2023)
Цвет	Измеритель цвета (CM-700d)	Li et al. (2023)
Летучие органические соединения	Газовая хроматография	Zhao et al. (2025)
In vivo испытания	Испытание подкожной имплантации у крыс и модель инфаркта миокарда у крыс с инъекцией гидрогеля	Hu et al. (2022)

Примечание. *Температура, при которой $G' = 1$ Па, при температурном сканировании от 2 до 60°C с нагревом 1°C/мин.

Note. *Temperature at which $G' = 1$ Pa during temperature ramp from 2 to 60 °C at a heating rate of 1 °C/min.

Оценка реологических и текстурных свойств, микроструктуры и лазерный дифракционный анализ частиц оказались наиболее распространенным в изученных работах, что свидетельствует о их ключевой роли в оценке пригодности материала для 3D-печати. В 77 % работ исследователи изучали предел текучести и/или модули накопления (G') и потерь (G''). Модуль накопления — параметр, отражающий способность материала накапливать энергию в процессе деформации (Riantiningtyas et al., 2021 и др.). Многие авторы отмечают значимость оценки именно этого параметра для понимания устойчивости объекта (его способностью поддерживать структуру) после печати (Daffner et al., 2021a; Daffner et al., 2021b; Zheng et al., 2021). В свою очередь, по результатам текстурного анализа Zheng et al. (2021) рассчитывали модуль Юнга как наклон кривой напряжение-деформация, который, согласно авторам, оказался тем критерием, который определяет устойчивость материала к печати. Аналогичное подтверждается исследованиями Sager et al. (2020), и Kan et al. (2024).

Исследования микроструктуры различными методами микроскопии, а также рентгеновской дифракцией, которые были проведены в 69 % работ, обусловлены необходимостью оценки взаимодействия компонентов в матрице 3DP-материала, степени структурной упорядоченности и особенностей формирования гелевой сети. Дополнительно в 38 % исследований анализируются дзета-потенциал и размер частиц, что позволяет оценить электростатическую стабильность системы и распределение частиц в дисперсной среде. Эти параметры играют ключевую роль в прогнозировании агрегативной устойчивости материала, его текучести и способности сохранять структуру после экструзии.

Таким образом базовый комбинированный подход к оценке пригодности материала для 3DP должен включать анализ реологических, текстурных свойств и микроструктуры, которые в основном являются экономически доступными процедурами. Кроме того, рядом других исследователей были предложены оригинальные методы для оценки стабильности и прочности напечатанных конструкций, включая анализ циклов замораживания-оттаивания, фотографирование и визуальное наблюдение, а также измерение физических параметров объекта после хранения (Xia et al., 2024; Shang et al., 2023). В другие нераспространенные методы анализа вошли: оценка устойчивости к окислению (Ji et al., 2025; Zhao et al., 2025), термоустойчивость (Xia et

al., 2024; Shi et al., 2025; Feng et al., 2025; Wang et al., 2025), стабильность после центрифугирования (Xia et al., 2024; Lu et al., 2024; Ji et al., 2025).

В случае разработок с конкретным потенциальным применением, например для использования в химической промышленности (Llamas-Unzueta et al., 2024), для доставки биоактивных веществ в составе функциональных продуктов (Joshi et al., 2024; Cheng et al., 2024), или для тканевой инженерии (Tut et al., 2022; Ghorbani et al., 2024), также были использованы специфические методы (анализ элементного состава, эффективность высвобождения биологически активных соединений и взаимодействия клеток с материалами). Кроме того, для других разработок на стыке пищевой науки и медицины также были применены и другие непопулярные для пищевой науки методы, например оценка цитотоксичности с МТТ и ССК-8 тестами, которая позволила определить биосовместимость и безопасность полученных 3DP материалов (Kayadurmus et al., 2024; Hu et al., 2022). В свою очередь, в исследовании Hu et al. (2022) были проведены *in vivo* испытания на крысах для оценки биологической реакции в физиологической среде после инъекций разработанного гидрогеля для 3DP.

Поле применения 3DP чернил с сывороточными белками

Сывороточные белки, благодаря своей универсальности и функциональности, нашли применение в шести ключевых направлениях 3DP, охватывающих как пищевую промышленность, так и биомедицину (Таблица 4).

Направление «персонализированные или кастомизированные продукты» объединило в себе две основные задачи — это разработка питания под индивидуальные нутритивные нужды потребителя (Kamlow et al., 2021; Kan et al., 2023 и др.), а также учет его эстетических ожиданий, связанных с формой, внешним видом и текстурой продукта, что рассматривалось в работах Liu et al. (2019), Chow et al. (2021) и др. При этом идея персонификации может совмещать обе эти задачи в одном продукте (Zhang et al., 2024). Функциональные и персонализированные продукты, согласно авторам, могут иметь общие нутритивные цели — восполнить дефицит полезных веществ, скорректировать физиологические процессы за счет регулярного употребления продуктов, обогащенных биоактивными добавками, а также уменьшить содержание определенных ком-

Таблица 4
Поле применения 3DP чернил с сывороточными белками

Table 4
Application Areas of Whey Protein-Based 3DP Inks

Применение	Примеры работ
Персонализированные или кастомизированные продукты	Du et al. (2021), Daffner et al. (2021a), Daffner et al. (2021b) Shi et al. (2025), Riantiningtyas et al. (2024), Liu et al. (2018), Liu et al. (2021), , Bareen et al. (2023a), Kamlow et al. (2021), Joshi et al. (2024), Chow et al. (2021), Zheng et al. (2024), Kamlow et al. (2022), Liu et al. (2019), Zhang et al. (2024), Kan et al. (2023), Lu et al. (2024), Kong et al. (2025)
Функциональные продукты питания	Fan et al. (2022), Joshi et al. (2024), Cheng et al. (2024), Cai et al. (2023), Kan et al. (2023), Shang et al. (2023), Kan et al. (2024), Feng et al. (2025), Araújo et al. (2025), Li et al. (2023), Ji et al. (2025)
Питание для людей с дисфагией	Z. Wang et al. (2024), Zhang et al. (2024), Kan et al. (2023), Li et al. (2024), Wang et al. (2025)
Продукты питания или съедобные материалы	Bareen et al. (2021), Uribe-Alvarez et al. (2023), Cai et al. (2022), Chow et al. (2021), Oliveira et al. (2020), Zhu et al. (2021), Shang et al. (2023), Xian et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Xu et al. (2023), Sager et al. (2020), W. Li et al. (2021), Liu et al. (2018), Shi et al. (2021), Dong et al. (2024)
Тканевая инженерия, биомедицина или фармацевтика	Tut et al. (2022), Llamas-Unzueta et al. (2022), Ghorbani et al. (2024), Oliveira et al. (2020), Xu et al. (2023), W. Li et al. (2021), Hewitt et al. (2019), Kayadurmus et al. (2024), Hu et al. (2022)
Химическая промышленность	Llamas-Unzueta et al. (2024)

понентов, таких как жир, сахар или соль. В некоторых работах акцент сделан на создании продуктов для целевых групп потребителей, например для людей с дисфагией. Z. Wang et al. (2024) для оценки применимости разработанных напечатанных продуктов в качестве питания для людей с дисфагией, проводили специальный тест по методу IDDSI (International Dysphagia Diet Standardization Initiative/Международная инициатива по стандартизации диеты при дисфагии), аналогично Kan et al. (2023), Zhang et al. (2024), Li et al. (2024).

В производстве персонализированных и функциональных продуктов питания сывороточные белки могут выступать ключевыми компонентами для защиты и доставки биологически активных веществ, обеспечивая их стабилизацию, контроль высвобождения и улучшение биодоступности. Zhang et al. (2024) доказали эффективность изолята сывороточного белка (WPI) в защите пробиотиков в 3D-печатных продуктах, предотвращая их инактивацию в процессе печати и хранения. В свою очередь, Joshi et al. (2024) разработали наноэмульсионные гели на основе WPI с инкапсулированным витамином D3, которые сохраняли стабильность как на этапе хранения, так и при экструзии через сопло 3D-принтера.

В ряде работ авторы не указывали предполагаемого пути реализации их разработанных 3DP чернил (Xia et al., 2024; Zheng et al., 2021; Shen et al., 2023). Однако

по сути работ их гели могут быть использованы как для систем доставки, так и для 3DP пищевых объектов.

Помимо пищевого применения, технологии 3DP на основе сывороточных белков находят широкое применение в биомедицине, тканевой инженерии и промышленности. В частности, сывороточный белок используется для создания каркасных структур, предназначенных для регенерации костной ткани. Исследования Tut et al. (2022) показали, что применение WPI способствует улучшению биосовместимости и поддерживает дифференциацию остеобластов, что критично для эффективного формирования костной ткани. В свою очередь, Ghorbani et al. (2024) использовали β-лактоглобулин (β-LG) в качестве покрытия для полимерных каркасных материалов, что позволило улучшить их механическую стабильность и биоактивность. Разработанные каркасы с WPI и β-LG также продемонстрировали способность к контролируемому высвобождению лекарственных веществ, что делает их перспективными для лечения костных дефектов. В других исследованиях на стыке медицины и пищевой науки с помощью электрохимической техники печати MEW были созданы каркасы из поликапролактона для регенерации кожных тканей (Hewitt et al., 2019); каркасы на основе концентрата сывороточных белков и полимолочной кислоты, которые увеличили выживаемость клеток, степень набухания, и скорость разложения для применения в лечении ран (Kayadurmus et al., 2024); гидрогели, сшитые нецитоток-

сическим методом с высокой биосовместимостью для создания тканевых конструкций, адаптированных к конкретному пациенту (Sümbelli et al., 2020); и метакрилированные гидрогели сывороточного белка с хорошей совместимостью *in vivo* и терапевтическими преимуществами в модели инфаркта миокарда (Hu et al., 2022).

Дополнительные возможности применения 3D-печатных структур на основе сывороточных белков связаны с созданием пористых углеродных материалов, подходящих для биомедицинских целей. Так, Llamas-Unzueta et al. (2022) разработали технологию карбонизации сывороточных паст, позволяющую получать углеродные каркасы с высокой пористостью, обладающие потенциалом для использования в тканевой инженерии. В последующих исследованиях (Llamas-Unzueta et al., 2024) этот метод был адаптирован для создания каталитических мешалок с проницаемыми лопастями. Эти структуры могут применяться в катализе, процессах очистки воды и газов, а также в разработке новых биосовместимых материалов.

Таким образом, исследования в области 3DP на основе сывороточных белков выходят за пределы пищевых технологий и демонстрируют перспективность в создании инновационных решений для биомедицины, тканевой инженерии и промышленного производства.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный анализ встраивается в глобальный контекст поиска решений для утилизации молочной сыворотки — побочного продукта, объемы которого продолжают расти параллельно с развитием молочной промышленности. В этом аспекте 3D-печать (3DP) выступает не только как технология Индустрии 4.0, но и как инструмент для создания добавочной стоимости из вторичных ресурсов, что соответствует современным экологическим и экономическим трендам.

Основные результаты обзора подтверждают, что сывороточные белки, особенно изолят (WPI), активно используются в составе рецептур для 3DP материалов благодаря ряду преимуществ (биодоступность, высокая пищевая ценность, биосовместимость, способность к формированию гелей и управляемой молекулярной сборке и др.). Способность WPI формировать стабильные гели, регулировать вязкость и создавать структурные каркасы делает его перспективным компонентом для 3DP-чернил. Однако выявленная концентрация

исследований на WPI с меньшим фокусом на другие обнаруженные компоненты (концентраты сывороточного белка, сухая сыворотка, бета-лактоглобулин, лактоферрин) указывает на недостаточную изученность других форм сывороточных белков, когда, например, гидролизаты, обладая биоактивными свойствами и гибкостью к модификации технологических свойств, могут расширить спектр применений 3DP материалов за счет улучшенной растворимости или функциональности.

Результаты анализа исследуемых свойств 3DP материалов с сывороточными белковыми компонентами в составе в основном совпадал с результатами других обзорных работ (N. Li et al., 2021; Y. Liu et al., 2024; M. Feng et al., 2024; Wu et al., 2024 и др.), которые также выделяли реологию, текстурный профиль, микроструктуру и характер межмолекулярных взаимодействий в качестве ключевых блоков для анализа, при этом отмечая важность последующей оценки напечатанных 3DP объектов. Однако эти работы не представляют отдельного анализа методов и примеров используемого оборудования для оценки этих свойств в рассмотренных эмпирических трудах, что сделано в данном обзоре и значительно облегчает работу исследовательских групп в организации экспериментов.

Среди двух основных направлений, обозначенных в обзоре, доминируют исследования, связанные с пищевыми продуктами (персонализированное и функциональное питание), что вероятно, обусловлено их большей разработанностью в рамках пищевой науки и доступностью применяемых методов. Вторым важным направлением является растущий интерес к биомедицинским приложениям, таким как тканевая инженерия и каркасные системы. В этом контексте сывороточные белки выступают связующим звеном между пищевой и медицинской отраслями. Однако для успешной интеграции данной технологии требуется более глубокое изучение методов управления свойствами 3DP-материалов с сывороточными белковыми компонентами в составе на различных стадиях их обработки и проведение смежных исследовательских работ в междисциплинарных группах.

Ограничения исследования

В настоящем обзоре были рассмотрены лишь некоторые из возможных подходов к управлению свойствами 3DP материалов с сывороточными компонентами в составе, представленных в эмпирических исследовани-

ях. Названия отдельных сывороточных белков не были включены в поисковые запросы, так как слово «whey», которое присутствовало в поисковой стратегии, обычно упоминается при описании белковых фракций сыворотки. Также следует отметить, что в данной работе не рассматривались источники, в которых было мало ценной информации о сыворотке и продуктов ее переработки в контексте 3DP, однако при первичном анализе работ в этих источниках были зафиксированы интересные идеи, которые могут быть актуальны для реализации в молочной промышленности, в том числе для сывороточного сырья. Например, иммобилизация бета-галактозидазы на 3D печатные каркасы для использования в проточных биореакторах (Shao et al., 2023), разработка инструментов для идентификации фальсификата с помощью 3DP (Livas et al., 2021), производство умной пищевой упаковки из биополимеров с использованием 3DP (Wang et al., 2025), получение аэрогелей для регенерации тканей (H. Liu et al., 2024) и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный обзор предметного поля подтверждает значительный потенциал сывороточных белков в создании материалов для 3D-печати. Ключевым критерием успеха научных разработок в этой области остается их переход в практическую плоскость, что актуализирует исследования, направленные на оптимизацию рецептов печатных чернил. Для систематизации накопленных знаний предлагается формирование специализированной библиотеки компонентов, основанной на принципах физико-коллоидной химии и пищевой химии, которые формируют понимание выгодных взаимодействий между разными компонентами. Такой подход позволит классифицировать ингредиенты по функциональным свойствам, упростив разработку новых составов.

Перспективным направлением представляется внедрение методов прогнозного моделирования комбинаций

компонентов, что способно автоматизировать подбор ингредиентов с учетом их реологических характеристик, текстурных параметров, особенностей микроструктуры и характерных межмолекулярных взаимодействий. Применение сывороточных белков за пределами пищевой промышленности, например, в биомедицинских каркасных системах, может стать драйвером для создания высокотехнологичных материалов.

Особый интерес вызывает интеграция в рецептуры 3DP материалов других сывороточных белковых ингредиентов, например, гидролизатов, что соответствует текущим трендам международных исследований. Представленный обзор может служить методической основой для научных групп, работающих с сывороткой, предлагая стратегии планирования экспериментов, выбора аналитических методов и генерации инновационных решений. Реализация этих направлений способна ускорить создание конкурентоспособных технологий в области пищевой и смежных отраслей.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Екатерина Ивановна Большакова: разработка методологии; проведение исследования; написание черновика рукописи; визуализация.

Наташа Поклар Ульрих: научное руководство; разработка концепции; курирование данных; валидация результатов; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ekaterina I. Bolshakova: methodology; investigation; writing — original draft; visualization.

Natasha Poklar Ulrich: supervision; conceptualization; data curation; validation; writing — review & editing.

ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCE

- Aït-Kaddour, A., Hassoun, A., Tarchi, I., Loudiyi, M., Boukria, O., Cahyana, Y., Ozogul, F., & Khwaldia, K. (2024). Transforming plant-based waste and by-products into valuable products using various "Food Industry 4.0" enabling technologies: A literature review. *Science of The Total Environment*, 955, 176872. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176872>
- Araújo, J. F., Fernandes, J.-M., Madalena, D., Gonçalves, R. F. S., Vieira, J. M., Martins, J. T., Vicente, A. A., & Pinheiro, A. C. (2025). Development of 3D-printed foods incorporating riboflavin-loaded whey protein isolate nanostructures: Characterization and in vitro digestion. *Food & Function*, 16(5), 2124–2135. <https://doi.org/10.1039/D4FO05102E>
- Bareen, M. A., Joshi, S., Sahu, J. K., Prakash, S., & Bhandari, B. (2021). Assessment of 3D printability of heat acid coagulated milk semi-solids 'soft cheese' by correlating rheological, microstructural, and textural properties. *Journal of Food Engineering*, 300, 110506. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110506>
- Bareen, M. A., Sahu, J. K., Prakash, S., Bhandari, B., & Naik, S. (2023a). A novel approach to produce ready-to-eat sweetmeats with variable textures using 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 344, 111410. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111410>
- Bareen, M. A., Joshi, S., Sahu, J. K., Prakash, S., & Bhandari, B. (2023b). Correlating process parameters and print accuracy of 3D-printable heat acid coagulated milk semisolids and polyol matrix: Implications for testing methods. *Food Research International*, 167, 112661. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112661>
- Cai, Q., Zhong, Y., Huang, Q., Huang, G., & Lu, X. (2023). Co-incorporation of probiotics into 3D printed custard cream with hydrophilic and hydrophobic bioactives. *Food Hydrocolloids*, 142, 108809. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108809>
- Cai, Q., Zhong, Y., Xu, M., Huang, Q., & Lu, X. (2022). 3D printed high oil custard cream: Effects of whey protein isolate, hydroxypropylated starch, and carrageenan on physicochemical properties and printing performance. *LWT*, 156, 113039. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113039>
- Carvajal-Mena, N., Tabilo-Munizaga, G., Pérez-Won, M., & Lemus-Mondaca, R. (2022). Valorization of salmon industry by-products: Evaluation of salmon skin gelatin as a biomaterial suitable for 3D food printing. *LWT*, 155, 112931. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112931>
- Chaudhary, V., Kajla, P., Verma, D., Singh, T. P., Kothakota, A., Prasath, V. A., Jeevarathinam, G., Kumar, M., Ramniwas, S., Rustagi, S., & Pandiselvam, R. (2023). Valorization of dairy wastes into wonder products by the novel use of microbial cell factories. *Trends in Food Science & Technology*, 142, 104221. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104221>
- Chen, Y., McClements, D. J., Peng, X., Chen, L., Xu, Z., Meng, M., Zhou, X., Zhao, J., & Jin, Z. (2024). Starch as edible ink in 3D printing for food applications: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(2), 456–471. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2106546>
- Cheng, Y., Wang, B., Lv, W., Zhong, Y., & Li, G. (2024). Effect of xanthan gum on physicochemical properties and 3D printability of emulsion-filled starch gels. *Food Hydrocolloids*, 149, 109613. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109613>
- Chourasia, R., Phukon, L. C., Abedin, M. M., Padhi, S., Singh, S. P., & Rai, A. K. (2022). Whey valorization by microbial and enzymatic bioprocesses for the production of nutraceuticals and value-added products. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101144. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101144>
- Chow, C. Y., Thybo, C. D., Sager, V. F., Riantiningtyas, R. R., Bredie, W. L. P., & Ahrné, L. (2021). Printability, stability, and sensory properties of protein-enriched 3D-printed lemon mousse for personalised in-between meals. *Food Hydrocolloids*, 120, 106943. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106943>
- Daffner, K., Ong, L., Hanssen, E., Gras, S., & Mills, T. (2021a). Characterising the influence of milk fat towards an application for extrusion-based 3D-printing of casein–whey protein suspensions via the pH–temperature-route. *Food Hydrocolloids*, 118, 106642. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106642>
- Daffner, K., Vadodaria, S., Ong, L., Nöbel, S., Gras, S., Norton, I., & Mills, T. (2021b). Design and characterization of casein–whey protein suspensions via the pH–temperature-route for application in extrusion-based 3D-Printing. *Food Hydrocolloids*, 112, 105850. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105850>

- Dong, S., Qian, Z., Liu, X., Liu, F., Zhan, Q., Hu, Q., & Zhao, L. (2024). Exploring gelation properties and structural features on 3D printability of compound proteins emulsion gels: Emphasizing pH-regulated non-covalent interactions with xanthan gum. *Food Chemistry*, 461, 141005. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141005>
- Du, Y., Zhang, M., & Chen, H. (2021). Effect of whey protein on the 3D printing performance of konjac hybrid gel. *LWT*, 140, 110716. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110716>
- Feng, C., Zhang, M., & Bhandari, B. (2018). Materials Properties of Printable Edible Inks and Printing Parameters Optimization during 3D Printing: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(19), 3074–3081. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1481823>
- Feng, M., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Guo, Z. (2024). Influence of components interaction in recombined food gels on 3D printing: A comprehensive review. *Food Hydrocolloids*, 151, 109782. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109782>
- Feng, L., Li, M., Dai, Z., Xu, Y., Zhang, Z., Zhang, M., Yu, D., & Li, D. (2025). 3D printed emulsion gels stabilized by whey protein isolate/polysaccharide as sustained-release delivery systems of β -carotene. *Carbohydrate Polymers*, 355, 123429. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123429>
- Fan, F., Li, S., Huang, W., & Ding, J. (2022). Structural characterization and fluidness analysis of lactose/whey protein isolate composite hydrocolloids as printing materials for 3D printing. *Food Research International*, 152, 110908. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110908>
- Ghazal, A. F., Zhang, M., & Guo, Z. (2023). Microwave-induced rapid 4D change in color of 3D printed apple/potato starch gel with red cabbage juice-loaded WPI/GA mixture. *Food Research International*, 172, 113138. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113138>
- Ghobadi, F., Kalantarzadeh, R., Menarbazari, A. A., Salehi, G., Fatahi, Y., Simorgh, S., Orive, G., Dolatshahi-Pirouz, A., & Gholipourmalekabadi, M. (2025). Innovating chitosan-based bioinks for dermal wound healing: Current progress and future prospects. *International Journal of Biological Macromolecules*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140013>
- Ghorbani, F., Kim, M., Ghalandari, B., Zhang, M., Varma, S. N., Schöbel, L., Liu, C., & Boccaccini, A. R. (2024). Architecture of β -lactoglobulin coating modulates bioinspired alginate dialdehyde-gelatin/polydopamine scaffolds for subchondral bone regeneration. *Acta Biomaterialia*, 181, 188–201. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2024.04.028>
- Gogoi, D., Kumar, M., & Singh, J. (2024). A comprehensive review on hydrogel-based bio-ink development for tissue engineering scaffolds using 3D printing. *Annals of 3D Printed Medicine*, 15, 100159. <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2024.100159>
- Gong, P., Yue, S., Wang, J., Xu, K., Yang, W., Li, N., Wang, J., Zhao, Y., Chen, F., & Guo, Y. (2025). Effect of ultrasound synergistic pH shift modification treatment on *Herichium erinaceus* protein structure and its application in 3D printing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 295, 139562. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139562>
- Hassoun, A., Tarchi, I., & Ait-Kaddour, A. (2024). Leveraging the potential of fourth industrial revolution technologies to reduce and valorize waste and by-products in the dairy sector. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 47, 100927. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100927>
- Hewitt, E., Mros, S., Mcconnell, M., Cabral, J., & Ali, A. (2019). Melt-electrowriting with novel milk protein/PCL biomaterials for skin regeneration. *Biomedical Materials*, 14(5). <https://doi.org/10.1088/1748-605X/ab3344>
- Hu, Z., Cao, W., Shen, L., Sun, Z., Yu, K., Zhu, Q., Ren, T., Zhang, L., Zheng, H., Gao, C., He, Y., Guo, C., Zhu, Y., & Ren, D. (2022). Scalable Milk-Derived Whey Protein Hydrogel as an Implantable Biomaterial. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(25), 28501–28513. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c02361>
- Hussain, S., Malakar, S., & Arora, V. K. (2021). Extrusion-Based 3D food printing: Technological approaches, material characteristics, printing stability, and post-processing. *Food Engineering Reviews*, 14(1), 100–119. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09293-w>
- Jeon, E. Y., Kim, Y., Yun, H.-J., Kim, B.-K., & Choi, Y.-S. (2024). 3D printing of materials and printing parameters with animal resources: A review. *Food Science of Animal Resources*, 44(2), 225–238. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2023.e73>
- Ji, Y., Sun, Y., Chang, Y., Ye, H., & Shen, X. (2025). Development and characterization of a high internal phase Pickering emulsion stabilized by whey protein-based nanoparticles with excellent antioxidant activity for 3-dimensional printing. *Journal of Dairy Science*, 108(6), 5611–5627. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-26043>

- Joshi, S., Sahu, J. K., Prakash, S., & Naik, S. N. (2024). Modulating the 3D printability of vitamin D3-nanoemulsion-based dairy gels: Influence of emulsifier on gel structure, printing behaviour and vitamin D3 retention. *Journal of Food Engineering*, 373, 112032. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112032>
- Kamlow, M.-A., Holt, T., Spyropoulos, F., & Mills, T. (2022). Release and co-release of model hydrophobic and hydrophilic actives from 3D printed kappa-carrageenan emulsion gels. *Food Hydrocolloids*, 132, 107852. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107852>
- Kamlow, M.-A., Spyropoulos, F., & Mills, T. (2021). 3D printing of kappa-carrageenan emulsion gels. *Food Hydrocolloids for Health*, 1, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2021.100044>
- Kayadurmus, H. M., Rezaei, A., Ilhan, E., Cesur, S., Sahin, A., Gunduz, O., Kalaskar, D. M., & Ekren, N. (2024). Whey protein-loaded 3D-printed poly (lactic) acid scaffolds for wound dressing applications. *Biomedical Materials*, 19(4), 045045. <https://doi.org/10.1088/1748-605X/ad565d>
- Kan, X., Dai, Z., Chen, D., Zeng, X., & Fan, X. (2023). High internal phase emulsion stabilized by whey protein isolate-gum Arabic Maillard conjugate: Characterization and application in 3D printing. *Food Hydrocolloids*, 145, 109137. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109137>
- Kan, X., Zhang, S., Kwok, E., Chu, Y., Chen, L., & Zeng, X. (2024). Granular hydrogels with tunable properties prepared from gum Arabic and protein microgels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 273, 132878. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132878>
- Kong, D., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Luo, Z. (2025). Novel heterogeneous 3D printing process of protein-polysaccharide gel containing orange juice sacs: Optimization of material properties and printing parameters. *International Journal of Biological Macromolecules*, 305, 141277. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141277>
- Li, G., Wang, B., Lv, W., Mu, R., & Zhong, Y. (2024). Effect of induction mode on 3D printing characteristics of whey protein isolate emulsion gel. *Food Hydrocolloids*, 146, 109255. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109255>
- Li, M., Feng, L., Xu, Y., Nie, M., Li, D., Zhou, C., Dai, Z., Zhang, Z., & Zhang, M. (2023). Rheological property, β -carotene stability and 3D printing characteristic of whey protein isolate emulsion gels by adding different polysaccharides. *Food Chemistry*, 414, 135702. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135702>
- Li, N., Qiao, D., Zhao, S., Lin, Q., Zhang, B., & Xie, F. (2021). 3D printing to innovate biopolymer materials for demanding applications: A review. *Materials Today Chemistry*, 20, 100459. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100459>
- Li, W., Martin, G. J. O., & Ashokkumar, M. (2021). Turbulence-induced formation of emulsion gels. *Ultrasonics Sonochemistry*, 81, 105847. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105847>
- Liu, L., & Ciftci, O. N. (2021). Effects of high oil compositions and printing parameters on food paste properties and printability in a 3D printing food processing model. *Journal of Food Engineering*, 288, 110135. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110135>
- Liu, H., Xing, F., Yu, P., Zhe, M., Shakya, S., Liu, M., Xiang, Z., Duan, X., & Ritz, U. (2024). Multifunctional aerogel: A unique and advanced biomaterial for tissue regeneration and repair. *Materials & Design*, 243, 113091. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113091>
- Liu, Y., Liu, D., Wei, G., Ma, Y., Bhandari, B., & Zhou, P. (2018). 3D printed milk protein food simulant: Improving the printing performance of milk protein concentration by incorporating whey protein isolate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.018>
- Liu, Y., Zhang, W., Wang, K., Bao, Y., Regenstein, J. M., & Zhou, P. (2019). Fabrication of gel-like emulsions with whey protein isolate using microfluidization: rheological properties and 3D printing performance. *Food and Bioprocess Technology*, 12(12), 1967–1979. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02344-5>
- Liu, Y., Zhang, Y., Cai, L., Zeng, Q., & Wang, P. (2024). Protein and protein-polysaccharide composites-based 3D printing: The properties, roles and opportunities in future functional foods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 272, 132884. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132884>
- Liu, Z., Chen, X., Li, H., Chitrakar, B., Zeng, Y., Hu, L., & Mo, H. (2024). 3D printing of nutritious dysphagia diet: Status and perspectives. *Trends in Food Science and Technology*, 147, 104478. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104478>
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science and Technology*, 69, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018>

- Livas, D., Trachioti, M., Banou, S., Angelopoulou, M., Economou, A., Prodromidis, M., Petrou, P., Kakabakos, S., & Kokkinos, C. (2021). 3D printed microcell featuring a disposable nanocomposite Sb/Sn immunosensor for quantum dot-based electrochemical determination of adulteration of ewe/goat's cheese with cow's milk. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 334, 129614. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129614>
- Llamas-Unzueta, R., Menéndez, J. A., Suárez, M., Fernández, A., & Montes-Morán, M. A. (2022). From whey robocasting to custom 3D porous carbons. *Additive Manufacturing*, 59, 103083. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103083>
- Llamas-Unzueta, R., Reguera-García, A., Sanz, I., Martín, C., Quintanilla, A., Menéndez, J. A., & Montes-Morán, M. A. (2024). 3D printed catalytic stirrers with permeable blades made of porous carbon. *Additive Manufacturing*, 87, 104233. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104233>
- Lu, Y., Schutyser, M. A. I., & Zhang, L. (2024). Enhancing 3D printing performance of O/W emulsions with asparagus fibre. *Future Foods*, 10, 100472. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100472>
- Ma, Y., & Zhang, L. (2022). Formulated food inks for extrusion-based 3D printing of personalized foods: A mini review. *Current Opinion in Food Science*, 44, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.12.012>
- Maiz-Fernández, S., Pérez-Álvarez, L., Silván, U., Vilas-Vilela, J. L., & Lanceros-Méndez, S. (2022). pH-Induced 3D Printable Chitosan Hydrogels for Soft Actuation. *Polymers*, 14(3), 650. <https://doi.org/10.3390/polym14030650>
- Mohapatra, J., Kumar, R., Basak, B., Saratale, R. G., Saratale, G. D., Mishra, A., Tripathy, S. K., Jeon, B.-H., & Chakraborty, S. (2025). A review on generation, composition, and valorization of dairy processing sludge: A circular economy-based sustainable approach. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 143, 45–64. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.08.045>
- Mu, X., Agostinacchio, F., Xiang, N., Pei, Y., Khan, Y., Guo, C., Cebe, P., Motta, A., & Kaplan, D. L. (2021). Recent advances in 3D printing with protein-based inks. *Progress in Polymer Science*, 115, 101375. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101375>
- Oliveira, S. M., Fasolin, L. H., Vicente, A. A., Fuciños, P., & Pastrana, L. M. (2020). Printability, microstructure, and flow dynamics of phase-separated edible 3D inks. *Food Hydrocolloids*, 109, 106120. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106120>
- Riantiningtyas, R. R., Sager, V. F., Chow, C. Y., Thybo, C. D., Bredie, W. L. P., & Ahrné, L. (2021). 3D printing of a high protein yoghurt-based gel: Effect of protein enrichment and gelatine on physical and sensory properties. *Food Research International*, 147, 110517. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110517>
- Rong, L., Chen, X., Shen, M., Yang, J., Qi, X., Li, Y., & Xie, J. (2023). The application of 3D printing technology on starch-based product: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 134, 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.02.015>
- Sager, V. F., Munk, M. B., Hansen, M. S., Bredie, W. L. P., & Ahrné, L. (2020). Formulation of heat-induced whey protein gels for extrusion-based 3D printing. *Foods*, 10(1), 8. <https://doi.org/10.3390/foods10010008>
- Shang, W., Sun, Y., Song, J., Zhang, P., Hou, Y., Wang, H., & Tan, M. (2023). Novel high internal phase oleogels-in-water pickering emulsions stabilized solely by whey protein isolate for 3D printing and fucoxanthin delivery. *Food Hydrocolloids*, 140, 108609. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108609>
- Shao, Y., Gan, N., Gao, B., & He, B. (2024). Sustainable 3D-printed β -galactosidase immobilization coupled with continuous-flow reactor for efficient lactose-free milk production. *Chemical Engineering Journal*, 481, 148557. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148557>
- Sharma, D., Manzoor, M., Yadav, P., Sohal, J. S., Aseri, G. K., & Khare, N. (2018). Bio-valorization of dairy whey for bioethanol by stress-tolerant yeast. In *Fungi and their Role in Sustainable Development: Current Perspectives* (pp. 349–366). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0393-7_20
- Shen, C., Chen, W., Li, C., Chen, X., Cui, H., & Lin, L. (2023). 4D printing system stimulated by curcumin/whey protein isolate nanoparticles: A comparative study of sensitive color change and post-processing. *Journal of Food Engineering*, 342, 111357. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111357>
- Shi, X., Liu, J., Liu, Q., Chen, Q., Wang, H., Sun, F., & Kong, B. (2025). Influence of different carrageenan contents on the rheological properties and 3D printing suitability of whey isolate protein-based emulsion gels. *Food Hydrocolloids*, 161, 110839. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110839>

- Shi, Y., Zhang, M., & Bhandari, B. (2021). Effect of addition of beeswax based oleogel on 3D printing of potato starch-protein system. *Food Structure*, 27, 100176. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100176>
- Su, A., & Al'Aref, S. J. (2018). History of 3D printing. In *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine* (pp. 1–10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803917-5.00001-8>
- Sümbelli, Y., Emir Diltemiz, S., Say, M. G., Ünlüer, Ö. B., Ersöz, A., & Say, R. (2021). In situ and non-cytotoxic cross-linking strategy for 3D printable biomaterials. *Soft Matter*, 17(4), 1008–1015. <https://doi.org/10.1039/D0SM01734E>
- Sun, Y., Juncos Bombin, A. D., Boyd, P., Dunne, N., & McCarthy, H. O. (2022). Application of 3D printing & 3D bioprinting for promoting cutaneous wound regeneration. *Bioprinting*, 28, e00230. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2022.e00230>
- Tamo, A. K., Djouonkep, L. D. W., & Selabi, N. B. S. (2024). 3D printing of polysaccharide-based hydrogel scaffolds for tissue engineering applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 270, 132123. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132123>
- Taneja, H., Salodkar, S. M., Singh Parmar, A., & Chaudhary, S. (2022). Hydrogel based 3D printing: Bio ink for tissue engineering. *Journal of Molecular Liquids*, 367, 120390. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120390>
- Thakur, R., Yadav, B. K., & Goyal, N. (2023). An insight into recent advancement in plant- and algae-based functional ingredients in 3D food printing ink formulations. *Food and Bioprocess Technology*, 16(9), 1919–1942. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03040-1>
- Tricco, A., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D. J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garritty, C., ... Straus, S. E. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7).
- Tut, T. A., Cesur, S., Ilhan, E., Sahin, A., Yildirim, O. S., & Gunduz, O. (2022). Gentamicin-loaded polyvinyl alcohol/whey protein isolate/hydroxyapatite 3D composite scaffolds with drug delivery capability for bone tissue engineering applications. *European Polymer Journal*, 179, 111580. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111580>
- Uranga, J., Carranza, T., Peñalba, M., Caba, K. de la, & Guerrero, P. (2024). Valorization of agar production residue as a filler in soy protein hydrogels for 3D printing. *International Journal of Bioprinting*, 9(4), 731. <https://doi.org/10.18063/ijb.731>
- Uribe-Alvarez, R., Murphy, C. P., Coleman-Vaughan, C., & O'Shea, N. (2023). Evaluation of ionic calcium and protein concentration on heat- and cold-induced gelation of whey protein isolate gels as a potential food formulation for 3D food printing. *Food Hydrocolloids*, 142, 108777. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108777>
- Wang, Y., McClements, D. J., Bai, C., Xu, X., Sun, Q., Jiao, B., Miao, S., Wang, Q., & Dai, L. (2024). Application of proteins in edible inks for 3D food printing: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 153, 104691. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104691>
- Wang, J., Jiang, X., Gan, H., Li, S., Peng, K., Sun, Y., Ma, M., & Yi, Y. (2025). Complexation-driven 3D printable whey protein-lotus root composite gels for dysphagia foods. *Carbohydrate Polymers*, 366, 123864. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123864>
- Wang, Y., Wu, Y., Chen, Z., Zhong, B., & Liu, B. (2025). Intelligent food packaging materials: Principles, types, applications, and hydrophobization. *Food Control*, 171, 111138. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111138>
- Wang, Z., Chen, F., Deng, Y., Tang, X., Li, P., Zhao, Z., Zhang, M., & Liu, G. (2024). Texture characterization of 3D printed fibrous whey protein-starch composite emulsion gels as dysphagia food: A comparative study on starch type. *Food Chemistry*, 458, 140302. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140302>
- Wu, R., Jiang, J., An, F., Ma, X., & Wu, J. (2024). Research progress of 3D printing technology in functional food, powering the future of food. *Trends in Food Science & Technology*, 149, 104545. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104545>
- Xia, S., Wang, Q., Rao, Z., Lei, X., Zhao, J., Lei, L., & Ming, J. (2024). High internal phase pickering emulsions stabilized by zein/whey protein nanofibril complexes: Preparation and lycopene loading. *Food Chemistry*, 452, 139564. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139564>
- Xian, D., Wu, L., Lin, K., Liu, P., Wu, S., Yuan, Y., & Xie, F. (2024). Augmenting corn starch gel printability for architectural 3D modeling for customized food. *Food Hydrocolloids*, 156, 110294. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110294>

- Xu, B., Jia, Y., Li, B., Ma, H., & Yang, W. (2023). Ultrastable emulsions constructed by self-assembly of two protein-polyphenol- anionic polysaccharide ternary complexes-stablized high internal phase emulsions. *LWT*, 176, 114517. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114517>
- Zhao, W., Li, Y., Xue, C., & Wei, Z. (2025). Fabrication of emulsion-templated oleogels with whey protein isolate and carboxymethyl chitosan for delivery of Antarctic krill oil. *Food Research International*, 213, 116611. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116611>
- Zhang, Y., Wang, Y., Dai, X., Li, Y., Jiang, B., Li, D., Liu, C., & Feng, Z. (2024). Biointerfacial supramolecular self-assembly of whey protein isolate nanofibrils on probiotic surface to enhance survival and application to 3D printing dysphagia foods. *Food Chemistry*, 460, 140720. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140720>
- Zhang, R., Huang, H., Ai, R., Li, D., Xu, Y., Jin, W., & Luo, Z. (2024). Fabrication of telechelic DNA-bridged food emulsion gel as edible ink for 3D printing. *Food Quality and Safety*, 8. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyad063>
- Zheng, L., Li, D., Wang, L., & Wang, Y. (2024). Tailoring 3D-printed high internal phase emulsion-rice starch gels: Role of amylose in rheology and bioactive stability. *Carbohydrate Polymers*, 331, 121891. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121891>
- Zheng, Z., Zhang, M., & Liu, Z. (2021). Investigation on evaluating the printable height and dimensional stability of food extrusion-based 3D printed foods. *Journal of Food Engineering*, 306, 110636. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110636>
- Zhu, S., Ruiz De Azua, I. V., Feijen, S., Van Der Goot, A. J., Schutyser, M., & Stieger, M. (2021). How macroscopic structure of 3D printed protein bars filled with chocolate influences instrumental and sensory texture. *LWT*, 151, 112155. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112155>

ОБ АВТОРАХ

Большакова Екатерина Ивановна, к.т.н., младший 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/0000-0002-8427-0387>, Scopus ID: 57881467200, SPIN-код: 9732-9017, e-mail: ekaterina.bolshakova.ac@yandex.ru

Поклар Ульрих Наташа, PhD, профессор, профессор биотехнического факультета Люблянского университета (1000, Республика Словения, г. Любляна, Конгрессная площадь, д. 12), <https://orcid.org/0000-0002-2731-9973>, Scopus ID: 57192276024, e-mail: natasa.poklar@bf.uni-lj.si

AUTHOR INFORMATION

Bolshakova Ekaterina Ivanovna, Cand. Sci. (Eng.), Junior Research Scientist, Laboratory of Biotransformation and Preservation Technologies, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya St., 35, Building 7). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8427-0387>, Scopus ID: 57881467200, SPIN-code: 9732-9017, e-mail: ekaterina.bolshakova.ac@yandex.ru

Poklar Ulrih Natasa, PhD, Professor, Professor, Biotechnical Faculty, University of Ljubljana (1000, Republic of Slovenia, Ljubljana, Kongresni trg, 12). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2731-9973>, Scopus ID: 57192276024, e-mail: natasa.poklar@bf.uni-lj.si