



FOOD METAENGINEERING

Пищевая Метаинженерия

Volume 2 | Issue 4 | 2024



■ FOOD METAENGINEERING

Научный рецензируемый журнал
№ 3 | 2024
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) (ORCID)

■ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Заведующий редакцией журнала, академический редактор

Тихонова Елена Викторовна — кандидат исторических наук, доцент, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности (Москва, Россия) (ORCID)

Ответственный секретарь

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

Туровская Светлана Николаевна — Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности. Технический секретарь. (ORCID 0000-0002-5875-9875)

Редактор по этике

Косычева Марина Александровна — доцент, кандидат филологических наук, доцент Российского биотехнологического университета (Москва, Россия) (ORCID)

■ 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», 2024

■ FOOD METAENGINEERING

Scientific peer-reviewed journal
No 3 | 2024
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, All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russian Federation

Executive Secretary

Anastasiia Riabova — 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, Russian Biotechnological University (BIOTECH University), 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, 2024

- **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, доктор биологических наук, директор Департамента координации деятельности организаций в сфере сельскохозяйственных наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация
- **Будрик Владислав Глебович** —
кандидат технических наук, директор Всероссийского научно-исследовательского института птицеперерабатывающей промышленности — филиала Всероссийского научно-исследовательского и технологического института птицеводства РАН, г. Ржавки, Российская Федерация
- **Донник Ирина Михайловна** —
академик РАН, профессор, доктор биологических наук, помощник президента НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, 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
- **Линденбек Марио** —
доктор сельскохозяйственных наук, Business consulting Lindenbeck, г. Берлин, Германия
- **Лобачевский Яков Петрович** —
академик РАН, профессор, доктор технических наук, директор 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
- **Просеков Александр Юрьевич** —
член-корреспондент РАН, профессор 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 филиала Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, 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/ученый секретарь Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности, г. Москва, Российская Федерация
- **Чернуха Ирина Михайловна** —
академик РАН, профессор, доктор технических наук, руководитель отдела координации международных и инициативных проектов Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, г. Москва, Российская Федерация

■ **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, Doctor of Biological Sciences, Director of the Department for Coordinating the Activities of Organizations in the Field of Agricultural Sciences, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

■ **Vladislav G. Budrik** —

Cand. Sci. (Engineering), Director of the All-Russian Research Institute of the Poultry Processing Industry, All-Russian Research and Technological Institute of Poultry Farming of the Russian Academy of Sciences, Rzhavki, Russian Federation

■ **Irina M. Donnik** —

Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Biological Sciences, presidential aide, National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation

■ **Ivan A. Evdokimov** —

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Engineering, Head of the Basic Department of Technology of Milk and Dairy Products, North Caucasian Federal University, Stavropol, Russian Federation

■ **Mario Lindenbeck** —

Doctor of Agricultural Sciences, Business Consulting Lindenbeck, Berlin, Germany

■ **Yakov P. Lobachevsky** —

Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Engineering, 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 Engineering, Deputy Director for Research, Scientific Research Institute of the Baking Industry (Moscow, Russia) (ORCID)

■ **Elena I. Melnikova** —

Professor, Doctor of Engineering, 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

■ **Alexander Yu. Prosekov** —

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Engineering, 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, Russia) (ORCID)

■ **Olga B. Fedotova** —

Senior Researcher, Doctor of Engineering, Leading Researcher / Scientific Secretary of the All-Russian Dairy Research Institut, Moscow, Russian Federation

■ **Irina M. Chernukha** —

Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Engineering, Head of the Department for Coordinating International and Initiative Projects, Federal Scientific Center for Food Systems named after V. M. Gorbato, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

РЕДАКТОРСКАЯ СТАТЬЯ

Е.В. Тихонова
Формулирование цели и исследовательских вопросов: рекомендации редактора..... 7

ОРИГИНАЛЬНОЕ ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В.В. Мартиросян, М.Н. Костюченко, М.В. Рейнов, О.Е. Тюрина, О.А. Савкина
Исследование продуцирования экзополисахаридов молочнокислыми бактериями, применяемыми в хлебопекарной промышленности, и сравнение методов их определения12

Е.Ю. Агаркова, В.В. Кондратенко, Н.С. Пряничникова
Концептуальный подход к конструированию продуктов энтерального питания26

О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Т.В. Кандиано
Разработка технологии продуктов питания с применением смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки.....36

ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

Л.Г. Креккер, Г.А. Донская, Е.В. Колосова, В.К. Карапетян
Микроорганизмы для повышения уровня глутатиона: обзор предметного поля53

EDITORIAL

Elena V. Tikhonova

Formulating Research Purpose and Questions: Recommendations from Editor..... 8

ORIGINAL EMPIRICAL RESEARCH

Vladimir V. Martirosyan, Marina N. Kostyuchenko, Mikhail V. Reynov, Olga E. Tyurina, Olesia A. Savkina

Study of Exopolysaccharide Production by Lactic Acid Bacteria used in the Baking Industry and Comparison of Methods for Their Determination.....13

Evgeniya Yu. Agarkova, Vladimir V. Kondratenko, Nataliya S. Pryanichnikova

Conceptual Approach to the Design of Enteral Nutrition Products.....27

Oleg A. Suvorov, Roman Kh. Kandrokov, Tatyana V. Candiano

Development of Food Technology with a Mixture of Whole-Milled Wheat and Sesame Flours.....37

A SCOPING REVIEW

Lyudmila G. Krekker, Galina A. Donskaya, Elena V. Kolosova, Varazdat K. Karapetyan

Microorganisms for Enhancing Glutathione Levels: A Scoping Review54

Формулирование цели и исследовательских вопросов: рекомендации редактора

Е.В. Тихонова

МГИМО Университет, г. Москва,
Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Цель исследования и формулировка исследовательских вопросов являются ключевыми элементами научной статьи, которые определяют направление работы и демонстрируют ее научную новизну. В статье рассматриваются основные принципы и рекомендации по корректной формулировке цели и исследовательских вопросов, анализируются наиболее распространенные ошибки, приводятся примеры правильных и неправильных формулировок. Материал адресован авторам, стремящимся повысить качество своих публикаций и облегчить восприятие своей работы читателями, рецензентами и редакторами.

Ключевые слова: формулирование цели научной статьи; формулирование исследовательских вопросов; ошибки авторов при формулировании исследовательских вопросов; ошибки авторов при формулировании цели исследовательской статьи

Корреспонденция:

Елена Викторовна Тихонова

E-mail: etihonova@gmail.com

Конфликт интересов:

автор сообщает
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 01.10.2024

Принята: 16.12.2024

Опубликована: 27.12.2024

Copyright: © 2024 Автор



Для цитирования: Тихонова, Е. В. (2024). Формулирование цели и исследовательских вопросов: рекомендации от редактора. *FOOD METAENGINEERING*, 2(4), 7–11. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.4.76>

Formulating Research Purpose and Questions: Recommendations from Editor

Elena V. Tikhonova

MGIMO University, Moscow,
Russian Federation

ABSTRACT

The research purpose and the formulation of research questions are key elements of a scientific article, as they define the direction of the study and demonstrate its scientific novelty. This article examines the main principles and recommendations for the proper formulation of research purpose and questions, analyzes common mistakes, and provides examples of correct and incorrect formulations. The material is intended for authors seeking to improve the quality of their publications and facilitate the perception of their work by readers, reviewers, and editors.

Keywords: formulating the purpose of a scientific article; formulating research questions; common mistakes authors make when formulating research questions; common mistakes authors make when formulating the purpose of a research article

Correspondence:

Elena V. Tikhonova

E-mail: etihonova@gmail.com

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 01.10.2024

Accepted: 16.12.2024

Published: 27.12.2024

Copyright: © 2024 The Author



To cite: Tikhonova, E. V. (2024). Formulating research purpose and questions: Recommendations from editor. *FOOD METAENGINEERING*, 2(4), 7–11.
<https://doi.org/10.37442/fme.2024.4.76>

Корректная постановка цели и исследовательских вопросов для научной статьи — это основа успешного исследования (Тихонова, 2024). Эти элементы научной статьи играют центральную роль, так как они не только определяют всю рамку описанного исследования, но и формируют структуру статьи, помогая автору сохранить фокус на главных аспектах исследования. Многие авторы сталкиваются с трудностями при их формулировании, что снижает качество статьи и глубину ее восприятие со стороны читателей и рецензентов.

Значение корректной формулировки цели и исследовательских вопросов

Цель исследования отвечает на вопрос «Зачем проводится исследование?» и определяет ожидаемый результат, тогда как исследовательские вопросы уточняют, какие конкретные аспекты проблемы будут рассмотрены. Цель и исследовательские вопросы должны быть логически взаимосвязаны и соответствовать тематике исследования. Четкая их формулировка позволяет: (1) читателям понять значимость исследования и его научную новизну; (2) рецензентам объективно оценить обоснованность исследования; (3) авторам организовать структуру рукописи, исключив ненужные отклонения от темы.

Рекомендации по формулированию цели

- (1) Цель должна быть ориентирована на достижение конкретного результата (разработка рекомендаций, создание модели, анализ влияния факторов, выявление закономерностей...).

Некорректно: *Изучить влияние климатических факторов на рост растений.*

Корректно: *Разработать модель прогнозирования влияния климатических факторов на рост сельскохозяйственных культур для оптимизации агротехнических решений.*

- (2) Формулировка цели должна быть четкой и выражать конкретное действие. Избегайте общих глаголов, таких как «изучить», «проанализировать», «исследовать», если за ними не стоит конкретный результат. Предпочтение следует отдавать глаголам, отражающим измеримые или практически значимые действия, например: «разработать», «систематизировать», «выявить», «определить».

Некорректно: *Проанализировать методы переработки пластиковых отходов* (неясно, какой результат даст анализ).

Корректно: *Систематизировать современные методы переработки пластиковых отходов и оценить их эффективность для снижения загрязнения окружающей среды* (методы будут не просто проанализированы, но также структурированы и оценены с точки зрения их воздействия).

- (3) Связывайте цель с практическим применением. Покажите, как результаты исследования могут быть полезны для науки или отрасли.

Некорректно: *Определить уровень загрязнения водоемов тяжелыми металлами.*

Корректно: *Разработать методику экспресс-оценки загрязнения водоемов тяжелыми металлами для оперативного экологического мониторинга.*

- (4) Делайте цель измеримой. Ориентируйтесь на такие формулировки, которые позволят оценить степень выполнения задачи.

Некорректно: *Исследовать влияние удобрений на урожайность пшеницы.*

Корректно: *Определить оптимальную дозировку азотных удобрений для увеличения урожайности пшеницы на 15% в условиях умеренного климата.*

Рекомендации по формулированию исследовательских вопросов

Исследовательские вопросы, помогая автору сосредоточиться на конкретных аспектах изучаемой проблемы, исключив отклонения от магистральной тематики, продемонстрировать новизну исследования и создать логическую связь между целью исследования, его методологией, результатами и их обсуждением: (1) структурируют текст статьи, задавая рамки для всех ее разделов, включая введение, методологию, результаты и обсуждение, (2) повышают научную ценность работы, подчеркивая, что исследование имеет конкретные задачи, направленные на решение актуальных научных или прикладных проблем, (3) четкость формулировок облегчает читателю восприятие статьи, так как позволяет сразу понять, что именно исследуется, почему это важно и как результаты связаны с изучаемой темой, (4) помогают сосредоточить внимание на результате, задавая ориентиры для анализа данных и подведения итогов.

Эффективно сформулированные исследовательские вопросы оказывают существенное влияние на организацию секций «Результаты» и «Обсуждение результатов», помогая сделать изложение логичным и последовательным. В разделе «Результаты» каждый вопрос определяет, какие данные необходимо представить, и задает порядок их изложения. Например, если один из вопросов звучит как «Какой температурный режим хранения обеспечивает максимальное сохранение витамина С?», необходимо выделить для него в секции «Результаты» отдельную подсекцию в которой должны быть приведены таблицы, графики или диаграммы, демонстрирующие уровень сохранности витамина С при различных температурах. Благодаря такому структурированию исследователь избегает включения в результаты данных, которые не имеют непосредственного отношения к поставленным вопросам.

В разделе «Обсуждение результатов» исследовательские вопросы играют ключевую роль в организации анализа данных. Они помогают автору структурировать обсуждение, следуя логике исследования, и обеспечивают четкую связь между полученными результатами, гипотезами и их интерпретацией. Один из эффективных способов организации этого раздела — рассматривать результаты в том же порядке, в котором были сформулированы исследовательские вопросы. Это позволяет избежать излишне обширных или отвлеченных рассуждений и сосредоточиться на значимых аспектах исследования. Например, если в статье был поставлен вопрос «Какие условия пастеризации минимизируют потери витаминов в молочных продуктах?», обсуждение результатов может быть построено следующим образом. Сначала автор анализирует, подтвердились ли исходные гипотезы: например, предположение о том, что температура ниже 72°C позволяет сохранить более 80% витамина С. Затем результаты сравниваются с данными предыдущих исследований: если они совпадают с выводами других авторов, это подтверждает надежность полученных данных; если есть расхождения, автор объясняет возможные причины, такие как различия в методике эксперимента или используемом оборудовании. Далее обсуждаются практические последствия исследования — например, какие температурные режимы пастеризации можно рекомендовать производителям молочной продукции для оптимального сохранения питательных веществ.

Для того, чтобы исследовательские вопросы помогали конкретизировать цель и направляли внимание читателей на отдельные аспекты исследования:

- (1) Фокусируйтесь на ключевых аспектах. Каждый вопрос должен охватывать один из важных элементов исследования.

Некорректно: *Как перерабатывают пластиковые отходы?* (Слишком общий вопрос, не уточняет, какие аспекты переработки рассматриваются).

Корректно: *Какие технологии механической переработки пластиковых отходов наиболее эффективны для повторного использования полимеров?* (Фокус на ключевом аспекте – эффективности конкретного метода).

- (2) Уточняйте параметры анализа. Вопросы должны включать конкретные переменные или условия.

Некорректно: *Как загрязнение воздуха влияет на здоровье?* (Слишком общий вопрос, не определены ни тип загрязнителей, ни группы риска, ни последствия).

Корректно: *Как концентрация твердых частиц PM_{2.5} в воздухе городских районов влияет на частоту заболеваний дыхательных путей у детей младше 5 лет?* (Четко определены переменные: тип загрязнителя, место, возрастная группа, эффект).

- (3) Связывайте с целью. Все вопросы должны быть напрямую связаны с достижением цели исследования. Если вопрос не приближает к ответу на главную проблему, его следует переформулировать или исключить.

Примеры корректных формулировок

Пример 1

Цель: Разработать рекомендации по оптимальным температурным режимам хранения, обеспечивающим максимальное сохранение витамина С в свежавыжатых цитрусовых соках.

Обоснование корректности формулировки:

- (1) Конечный результат: указано, что итогом исследования станут рекомендации, применимые в реальной практике.
- (2) Объект исследования: свежавыжатые цитрусовые соки; предмет исследования: влияние температурных режимов на сохранение витамина С.
- (4) Практическая значимость: результаты помогут производителям соков улучшить качество продукции, обеспечив сохранение полезных веществ.

- (5) Конкретность: цель ограничена одним параметром (витамин С) и определенной группой продуктов (цитрусовые соки), что делает исследование сфокусированным и выполнимым.

Возможные исследовательские вопросы

- (1) Какой температурный режим хранения обеспечивает максимальное сохранение витамина С в свежевыжатых цитрусовых соках?
- (2) Как продолжительность хранения при различных температурах влияет на содержание витамина С?
- (3) Влияют ли колебания температуры на уровень разрушения витамина С в соках?
- (4) Есть ли различия в сохранности витамина С между различными типами цитрусовых соков (например, апельсиновый, грейпфрутовый, лимонный)?
- (5) Как взаимодействуют другие факторы хранения (свет, доступ кислорода) с температурой в контексте сохранения витамина С?

Пример 2

Цель: *Определить оптимальные условия пастеризации молочных продуктов для минимизации потерь питательных веществ и улучшения их органолептических свойств.*

Обоснование корректности формулировки:

- (1) Конечный результат: цель направлена на определение оптимальных условий, что подразумевает четкие выводы, которые можно внедрить на практике.
- (2) Объект исследования: молочные продукты; предмет исследования: влияние условий пастеризации на питательные вещества и органолептические свойства.
- (4) Практическая значимость: помогает разработать технологии обработки, которые сохраняют питательную

ценность и улучшают качество продуктов, что важно для производителей и потребителей.

- (5) Конкретность: акцент сделан на двух аспектах — сохранение питательных веществ и улучшение органолептических свойств, что делает цель достаточно детализированной, измеряемой и ориентированной на решение конкретной проблемы.

Возможные исследовательские вопросы

- (1) Какие температуры и длительности пастеризации минимизируют потери белков и витаминов в молочных продуктах?
- (2) Как изменение температурного режима пастеризации влияет на органолептические свойства (вкус, текстура, аромат) молочных продуктов?
- (3) Какие питательные вещества больше всего разрушаются при стандартных условиях пастеризации?
- (4) Существует ли взаимосвязь между температурой пастеризации и потребительскими предпочтениями по органолептическим характеристикам молочных продуктов?
- (5) Как частота и длительность пастеризации влияют на сроки хранения молочных продуктов при сохранении их питательной ценности?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель исследования и исследовательские вопросы играют важнейшую роль в структуре рукописи научной статьи. Их корректная формулировка позволяет не только улучшить восприятие текста статьи, но и повысить шансы рукописи на публикацию. Авторам следует тщательно прорабатывать формулировку целеполагания и исследовательские вопросы, уделяя внимание как конкретике формулировок, так и их логической связи с содержанием статьи.

REFERENCES/ ЛИТЕРАТУРА

Тихонова, Е. В. (2024). Эффективные стратегии написания научных статей: конструирование целеполагания и исследовательских вопросов. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 32(2), 8–24. <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.2.579>

Tikhonova, E. V. (2024). Effective strategies for writing research articles: Constructing strong purpose and research questions. *Storage and Processing of Farm Products*, 32(2), 8–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.2.579>

Исследование продуцирования экзополисахаридов молочнокислыми бактериями, применяемыми в хлебопекарной промышленности, и сравнение методов их определения

В.В. Мартиросян¹, М.Н. Костюченко¹, М.В. Рейнов¹, О.Е. Тюрина¹, О.А. Савкина²

¹ Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, г. Москва, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский филиал ФГАНУ НИИ хлебопекарной промышленности, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Экзополисахариды представляют собой высокомолекулярные соединения, состоящие из остатков моносахаридов и их производных, обладающие биологической активностью и выполняющие протекторную роль в физиологических процессах. Поиск штаммов молочнокислых бактерий, продуцирующих экзополисахариды, является перспективным направлением исследования за счет доказанного положительного влияния их на реологические свойства ферментированных пищевых продуктов, а также здоровье человека.

Цель: Провести исследование способности штаммов молочнокислых бактерий из коллекции Федерального государственного автономного научного учреждения «Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности» (далее ФГАНУ НИИХП) продуцировать экзополисахариды, а также проведение сравнения различных методов их определения – гравиметрического, фенол-серноокислого по Дюбуа, метода с применением антронового реактива и титриметрического по Бертрану.

Материалы и методы: Для определения способности продуцировать экзополисахариды культуры молочнокислых бактерий культивировали на 12 % солодовом сусле в течение 48 ч при оптимальной для каждого штамма температуре. После удаления белка и проведения диализа в культуральной жидкости определяли количество экзополисахаридов различными методами.

Результаты: Установлено, что все коллекционные штаммы образовывали экзополисахариды в разном количестве. Определены штаммы, продуцирующие наибольшее количество экзополисахаридов — *L. amilolyticus*-2, *L. plantarum* A-63(d), *L. amilolyticus* -1, *L. brevis*-78(d), *L. paracasei*-6. Выход продукта, содержащего экзополисахариды, продуцентами которых являлись молочнокислые бактерии, находился в пределах от 7 до 14,4 мг в 1 мл культуральной жидкости. Результаты исследования позволили сделать вывод о корректности метода Дюбуа для оценки содержания применительно к экзополисахаридам, продуцируемым молочнокислыми бактериями.

Выводы: Проведенные исследования подтверждают способность штаммов молочнокислых бактерий из коллекции ФГАНУ НИИХП продуцировать экзополисахариды. Установлена корректность метода по Дюбуа для определения экзополисахаридов, продуцируемых молочнокислыми бактериями.

Ключевые слова: молочнокислые бактерии; экзополисахариды; фенол-серноокислый метод по Дюбуа; антроновый реактив; титриметрический метод по Бертрану

Корреспонденция:

Владимир Владимирович
Мартиросян,

E-mail: info@gosniihp.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 12.04.2024

Принята: 16.12.2024

Опубликована: 27.12.2024

Copyright: © 2024 Авторы



Для цитирования: Мартиросян, В. В., Костюченко, М. Н., Рейнов, М. В., Тюрина, О. Е., & Савкина, О. А. (2024). Исследование продуцирования экзополисахаридов молочнокислыми бактериями, применяемыми в хлебопекарной промышленности, и сравнение методов их определения. *FOOD METAENGINEERING*, 2(4), 12–25. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.4.67>

Study of Exopolysaccharide Production by Lactic Acid Bacteria used in the Baking Industry and Comparison of Methods for Their Determination

Vladimir V. Martirosyan¹, Marina N. Kostyuchenko¹, Mikhail V. Reynov¹, Olga E. Tyurina¹, Olesia A. Savkina²

¹ Scientific Research Institute for the Baking Industry, Moscow, Russian Federation

² Saint-Peterburg Branch of «Scientific Research Institute for the Baking Industry», Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: Exopolysaccharides are high molecular weight compounds consisting of monosaccharide residues and their derivatives, which have biological activity and play a protective role in physiological processes. The search for strains of lactic acid bacteria producing exopolysaccharides is a promising area of research due to their proven positive effect on the rheological properties of fermented food products, as well as human health.

Purpose: To study the ability of lactic acid bacteria strains from the collection of FGANU NIIHP to produce exopolysaccharides, as well as to compare different methods of their determination — gravimetric, phenol-sulfuric acid Dubois method, anthrone reagent method and titrimetric Bertrand method.

Materials and Methods: To determine the ability to produce exopolysaccharides, cultures of lactic acid bacteria were cultured on 12% malt mash for 48 hours at the optimum temperature for each strain. After protein removal and dialysis, the amount of exopolysaccharides was determined in the culture fluid by different methods.

Results: It was found that all the collection strains formed exopolysaccharides in different amounts. The strains producing the highest amount of exopolysaccharides were identified as *L. amilolyticus*-2, *L. plantarum*A-63(d), *L. amilolyticus*-1, *L. brevis*-78(d), *L. paracasei*-6. The yield of the product containing exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria ranged from 7 to 14.4 mg in 1 ml of culture liquid. The results of the study allowed us to conclude the correctness of Dubois method for estimating the content with respect to exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria.

Conclusion: The conducted studies confirm the ability of strains of lactic acid bacteria, from the collection of FGANU NIIHP, to produce exopolysaccharides. The correctness of the Dubois method for the determination of exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria was established.

Keywords: Lactic acid bacteria; exopolysaccharides; Dubois phenol-sulfuric acid method; anthrone reagent; Bertrand titrimetric method

Correspondence:

Vladimir V. Martirosyan,
E-mail: info@gosniihp.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 12.04.2024

Accepted: 16.12.2024

Published: 27.12.2024

Copyright: © 2024 The Authors



To cite: Martirosyan, V. V., Kostyuchenko, M. N., Reynov, M. V., Tyurina, O. E., & Savkina, O. A. (2024). Study of exopolysaccharide production by lactic acid bacteria used in the baking industry and comparison of methods for their determination. *FOOD METAENGINEERING*, 2(4), 12–25. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.4.67>

ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия большое внимание уделяется исследованиям способности микроорганизмов синтезировать экзополисахариды (ЭПС) — высокополимерные соединения, состоящие из остатков моносахаридов и их производных, продуцируемые растениями, водорослями, грибами и бактериями. Микробные внеклеточные ЭПС представляют собой полисахариды, которые ассоциированы или связаны с поверхностью клетки, образуя капсулу, или выделяются наружу в виде слизи. Интерес к ЭПС, синтезированным молочнокислыми бактериями (МКБ), обусловлен тем, что на международном уровне их продуцентам, присвоен статус безопасности — GRAS (generally recognized as safe), подтверждающий возможность применения этих организмов в производстве безопасных пищевых продуктов. Наиболее часто используются для производства ЭПС штаммы МКБ, таких родов как *Streptococcus*, *Lactococcus*, *Pediococcus*, *Leuconostoc* и *Weissellale*. *Lactobacillus*, признанные безопасными микроорганизмами, также способны создавать ЭПС с множеством различных структур без какого-либо риска для здоровья (Korcz, 2021; Nguyen, 2020; Oleksy-Sobczak, 2020). Экзопполисахариды, продуцируемые МКБ, проявляют противоопухолевую, противоязвенную, антиоксидантную, иммуностимулирующую активности, способствуют снижению уровня холестерина в крови человека. Молочнокислые бактерии продуцируют различные функциональные олигосахариды, имеющие большое промышленное значение в качестве пребиотиков, нутрицевтиков, подсластителей, иммуностимуляторов (Jurášková, 2022; Kim, 2010; Patel, 2012). В технологии пищевых продуктов ЭПС могут быть использованы в качестве натуральных биоагустителей, стабилизаторов, эмульгаторов, желеобразующих агентов, так и выступать в роли факторов адгезии полезных микроорганизмов на стенках кишечника. Преимущества использования штаммов лактобактерий, синтезирующих ЭПС *in situ*, состоят в увеличении продолжительности холодильного хранения, уменьшении синерезиса, улучшении текстуры и реологических характеристик ферментированных молочных продуктов (Daba 2021; Dilna, 2015; Jurášková, 2022; Nguyen, 2020; Prete, 2021). Новым направлением применения ЭПС является использование их в качестве биофлокулянтов, биопоглотителей, средств для выведения тяжелых металлов из организма, средств доставки лекарств (Zajsek, 2013).

Большое значение имеет использование ЭПС в хлебопечении. Так эффективным способом повышения качества хлеба из муки пшеничной с пониженным содержанием клейковины является применение в качестве улучшителей гидрофильных добавок различного происхождения, в том числе микробных полисахаридов. ЭПС действует как гидроколлоид, улучшающий качество пшеничного хлеба с высоким содержанием клетчатки (Katina, 2009).

Различные экзополисахариды, продуцируемые *Leuconostoc mesenteroides*, положительно влияют на реологию теста, текстуру хлеба и позволяют снизить добавки гидроколлоидов при производстве безглютеновых изделий (Das, 2015; Galle 2010; Moroni, 2011). Полимеры, продуцируемые *L. mesenteroides*, *W. confusa*, *W. cibaria* и *Pediococcus parvulus*, улучшают реологические свойства, текстуру, восприятие вкуса у ферментированных продуктов, в том числе пшеничного хлеба (Kavitate, 2016). В ряде исследований было показано, что применение таких ЭПС как декстран, продуцируемый *Leuconostoc mesenteroides* и *Weissella cibaria*), леван *L. sanfranciscensis*, рейтеран *L. reuteri*, положительно влияет на реологию теста, текстуру хлеба и может заменить или сократить использование гидроколлоидов в пшеничном и безглютеновом хлебе (Zarour, 2017; Galle 2010; Moroni, 2011; Rhmkorf, 2012).

Закваска на основе молочнокислых бактерий и дрожжей играет важную роль в технологии хлеба. Основной функцией МКБ являются подкисление теста, а также образование веществ, участвующих в формировании вкуса и аромата хлеба (Локачук, 2023). Особая метаболическая активность, такая как синтез ЭПС, также может иметь большое значение при производстве хлеба, поскольку, несмотря на многие полезные свойства ЭПС, продуцируемых бактериями рода *Lactobacillus*, процесс их получения делает их нерентабельным из-за низкой эффективности их синтеза и высоких технологических затрат. В связи с этим перспективным представляется разработка и использование полуфабрикатов с направленным культивированием ЭПС-продуцирующих штаммов молочнокислых бактерий.

Актуальным является проведение исследований по изучению способности штаммов МКБ продуцировать экзополисахариды. Экзопполисахариды, продуцируемые МКБ, представляют собой разветвленные полимеры — гомополисахариды или гетерополисахариды. Первые — макромолекулы, построенные из остатков

моносахарида одного типа, к ним относятся декстран, мутан, альтернан, пуллулан, леван, инулин и другие. Вторые состоят из повторяющихся одинаковых блоков, построенных из остатков моносахаридов разных типов, к ним относятся геллан, ксантан, кефиран и другие. Большинство ЭПС представляют собой гетерополисахариды, содержащие от трех до восьми повторяющихся единиц, состоящих из двух или более моносахаридов (Ryan, 2014). Гетерополисахариды могут также содержать остатки аминокислот, глюкуроновой кислоты, различные функциональные группы, такие как ацетильная, фосфатная и другие. Масса гетерополисахаридов лежит в диапазоне от 10^4 до 10^6 Да, гомополисахариды тяжелее — их средняя масса составляет 10^7 Да (Amiri, 2019; Goh, 2005; Абрамова, 2009).

Несмотря на глобальные исследования экзополисахаридов, продуцируемых *Lactobacillus* sp., механизм их синтеза до конца не открыт. Очень мало известно о кинетике синтеза ЭПС, особенно когда продолжительность культивирования штаммов является одной из переменных процесса (Oleksy-Sobczak, 2020). Показано, что в процессе ферментации МКБ глюкоза и/или фруктоза используются для синтеза глюканов (декстранов), фруктанов (леванов) или альтернанов (Zarour, 2017). Состав среды (источники углерода и азота, витамины, минералы и т.д.), тип лабораторных штаммов и условия роста (температура, перемешивание, продолжительность инкубации, pH, концентрация кислорода и т.д.) являются важными факторами для общего выхода ЭПС, продуцируемых МКБ.

Несмотря на большое количество исследований все еще недостаточно информации о кинетике синтеза ЭПС, где изменения в выходе продукции и составе ЭПС могут привести к значительной потере продукции (Fukuda, 2010; Jurášková, 2022; Oleksy-Sobczak, 2020). Количественная оценка ЭПС, произведенных молочнокислыми бактериями, требует извлечения из культуральной среды или пищевых матриц. В настоящее время используют несколько методов выделения ЭПС из биологических масс. В основном для выделения и определения количества ЭПС биологическую массу растворяют в воде, центрифугированием или фильтрованием отделяют нерастворимую часть. Из водного раствора ЭПС выделяют осаждением этиловым или изопропиловым спиртом. Очищают многократным переосаждением спиртом, белковые примеси из водных растворов осаждают трихлоруксусной или сульфосалициловой кислотой, от низкомолекулярных примесей избавля-

ются с помощью диализа (Goh, 2005; Абрамова, 2009; Куис, 2009; Винокуров, 2004; Piermaria, 2008; Cerning, 1988). Существует метод выделения ЭПС с использованием аппарата электроосаждения с полупроницаемой разделительной мембраной (Григорьев, 1990). Наиболее чистый продукт с разделением на фракции по весу получают с использованием гель-хроматографии (Куис, 2009; Фокина, 2015). Широко применяется метод количественного определения полученных после очистки ЭПС — фенол-сернокислый метод по Дюбуа (Dubois, 1956). Для определения структуры ЭПС их подвергают гидролизу и анализируют мономерный состав методами ионнообменной, высокоэффективной жидкостной или газовой хроматографий (Кичемазова, 2019).

Наиболее распространенным методом определения содержания углеводной части полисахаридов является фенол-сернокислый метод Дюбуа. Однако имеются данные о неточности этого метода, не отражающего реальную концентрацию полисахарида, а носящего скорее сравнительный характер (Еникеев, 2011). Точное определение содержания ЭПС — определение массовой доли полисахарида в пределах погрешности измерения — могут дать методы гель-хроматографии, высокоэффективной жидкостной и газовой хроматографии, а также капиллярного электрофореза после предварительного гидролиза полисахаридов, и чаще всего неотделимо от изучения строения полисахарида. Однако высокая стоимость и трудоемкость этих методов делает их применение нецелесообразным в случаях, где не предусматривается задача изучения строения ЭПС или определения точного их содержания. Во многих практических случаях достаточно лишь оценки содержания ЭПС.

Для корректной оценки содержания ЭПС актуальным является проведение сравнения различных методов определения полисахаридов, а также определение содержания примесей в выделенных продуктах.

Кроме того, в настоящее время большой ряд работ посвящен исследованию влияния различных питательных сред и внесения сахаров на синтез разными штаммами молочнокислых бактерий ЭПС. Однако в значительной части работ в качестве питательной среды для культивирования МКБ используется бульон Мана-Рогозы-Шарпа (MRS). Молочнокислые бактерии для хлебопекарной промышленности поддерживаются в коллекции и культивируются не на молочных питательных средах, а на зерновых средах, в частности, солодовом сусле с 12% сухих веществ, более близкой по составу теста

В.В. Мартиросян, М.Н. Костюченко, М.В. Рейнов, О.Е. Тюрина, О.А. Савкина

и заквасок. В связи с тем, что состав питательной среды оказывает непосредственное действие на синтез ЭПС, актуальным является определение способности к синтезу ЭПС молочнокислых бактерий, при культивировании их на солодовом сусле.

Целями текущего исследования являлись изучение способности штаммов МКБ из коллекции ФГАНУ НИИХП продуцировать ЭПС и сравнение методов определения ЭПС — гравиметрического, фенол-серноокислого по Дюбуа, метода с применением антронового реактива и титриметрического по Бертрану. Для определения чистоты продукта и оценки корректности гравиметрического метода определено содержание в качестве примеси белка в выделенных продуктах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Для исследования были использованы штаммы молочнокислых бактерий из музейной коллекции ФГАНУ НИИХП промышленно-ценных штаммов для хлебопекарной промышленности. Перечень используемых штаммов и температура их культивирования представлены в Таблице 1.

Таблица 1
Температура культивирования штаммов МКБ

Table 1
Cultivation Temperature of LAB Strains

Оптимальная температура культивирования, °C	Перечень штаммов МКБ, культивируемых при данной температуре
30	<i>L.brevis</i> -78(d), <i>L.casei</i> -1(d), <i>L.brevis</i> -5(d), <i>L. plantarum</i> A-63(d), <i>L.rapi</i> -1
37	<i>L.dioliworans</i> -1, <i>L. fermentum</i> -34 (d), <i>L. para casei</i> -2, <i>L. paracasei</i> -6, <i>L. paracasei</i> -5, <i>L. paracasei</i> -4, <i>L. paracasei</i> -3, <i>L. paracasei</i> -1, <i>L.dioliworans</i> -1
50	<i>L. helveticus</i> -1, <i>L.amilolyticus</i> -1, <i>L.amilolyticus</i> -2

Процедура и методы исследования

Культивирование МКБ для анализа

Для получения ЭПС культуры МКБ культивировали на 12 % солодовом сусле в течение 48 ч при оптимальной для каждого штамма температуре (Таблица 1).

Определение титра клеток

Содержание клеток МКБ определяли в конце культивирования посевом на питательную среду MRS -агар (Condalab, Испания).

Подготовка к анализам.

Выделение высушенного остатка

Культуральную жидкость в объеме 9–14 мл центрифугировали 30 минут при 8000 об/мин. Осадок после отделения надосадочной жидкости промывали 3 мл дистиллированной воды, центрифугировали 15 мин при 8000 об/мин. Центрифугаты объединяли и упаривали на роторном испарителе под вакуумом, не допуская сильного пенообразования, до объема в 2–3 мл. По каплям и при перемешивании прибавляли 8 мл этилового спирта и выдерживали смесь сутки при 3–7 °С. Надосадочную жидкость сливали. Остаток растворяли в 2–3 мл дистиллированной воды, при необходимости нагревая до 40–50 °С, при перемешивании, и после полного растворения осадка повторяли процедуру осаждения спиртом. Для очистки от белка осадок растворяли в 2 мл дистиллированной воды, прибавляли раствор, содержащий 350 мг трихлоруксусной кислоты в 2 мл воды, и выдерживали смесь при 3–7 °С в течение двух суток. Затем смесь центрифугировали 15 минут при 10 000 об/мин, осадок после отделения надосадочной жидкости промывали 2 мл воды и центрифугировали, центрифугаты объединяли. Проводили диализ против дистиллированной воды в мешке с диаметром пор 3,5 кДа. Центрифугат в диализном мешке выдерживали в емкости с 2 л воды в течение нескольких суток при 3–7 °С, дважды в день аккуратно перемешивая и трижды меняя воду через 12–24 ч. После окончания диализа упаривали почти всю воду из содержимого диализного мешка на роторном испарителе под вакуумом при 55–60 °С, не допуская сильного пенообразования. Для максимального удаления воды к остатку прибавляли 10 мл безводного изопропанола и стеклянной палочкой затирали вязкую смесь до образования однородной кристаллической массы, затем изопропанол отгоняли и в течение часа выдерживали остаток под вакуумом при температуре 57–60 °С. Колбу с остатком взвешивали и определяли массу выделенного высушенного продукта, содержащего ЭПС. Пересчитывали количество выделенного высушенного продукта на 1 мл культуральной жидкости, мг/мл. Далее сухой продукт исследовали разными методами — фенол-серноокислотым по Дюбуа, фотометрическим методом с использованием антронового реактива, а также по Бертрану

Фенол-сернокислый метод по Дюбуа

Для определения содержания ЭПС в выделенном продукте непосредственно перед анализом взвешивали выделенный сухой продукт на аналитических весах с точностью до десятой доли миллиграмма (в количестве 10–13 мг) и растворяли в 200 мл дистиллированной воды для получения концентрации ЭПС около 50 мкг/мл, оптимальной для определения фотометрическими методами. В емкость типа термостойкой пробирки приливали 1 мл анализируемого или градуировочного раствора, добавляли 1 мл 5% свежеприготовленного раствора фенола в дистиллированной воде и перемешивали. При перемешивании по каплям прибавляли 5 мл концентрированной серной кислоты, смесь еще раз хорошо перемешивали и оставляли на 5 минут. После этого в течение 15 минут три раза встряхивали для лучшего поглощения смесью необходимого для реакции кислорода из воздуха. Затем определяли оптическую плотность раствора при длине волны 490 нм. Для кюветы сравнения готовили смесь по вышеуказанной методике, взяв вместо раствора сахара 1 мл дистиллированной воды. В качестве градуировочных использовали растворы глюкозы с концентрациями 9, 18, 36, 54, 72 и 90 мкг/мл.

Фотометрический метод с использованием антронового реактива

Взвешивали выделенный сухой продукт на аналитических весах с точностью до десятой доли миллиграмма (10–13 мг) и растворяли в 200 мл дистиллированной воды. Определение проводили по методике ГОСТ 26176–91 «Определение содержания углеводов в комбикормах». При взаимодействии полисахарида, серной кислоты и антрона образуются окрашенные продукты реакции, оптическая плотность раствора определяется при длине волны 625 нм. Для построения градуировочной зависимости использовали растворы глюкозы.

Метод определения ЭПС по Бертрану

Гидролиз ЭПС проводили по методике Плешкова¹. Навеску 30–50 мг полученного сухого продукта, взвешенную на аналитических весах с точностью до десятой доли миллиграмма, растворяли в 5 мл 0,7н соляной кислоты и нагревали смесь на кипящей водяной бане в те-

чение трех часов. После охлаждения прибавляли одну небольшую каплю 1% спиртового раствора фенолфталеина и подщелачивали 5% раствором гидроксида натрия до появления слабо-розового окрашивания.

Определение содержания моносахаридов проводили по методике ГОСТ 5672–68. При взаимодействии реактива Фелинга с восстанавливающими сахарами образуется выпадающая в осадок закись меди, которая отделяется и обрабатывается раствором железоммонийных квасцов в кислой среде с образованием солей двухвалентного железа. Титрованием раствором перманганата калия двухвалентное железо окисляется и по расходу титранта определяется количество присутствовавшего в аликвоте восстанавливающего сахара.

Определения содержания ЭПС реализовывалось с опорой на эмпирическую таблицу соответствия количества меди и глюкозы Загибалова и соавт.²

Определение возможного содержания белков и пептидов

Содержание белка и пептидов определяли по методике, представленной в ГОСТ 25832–89 с использованием полуавтоматического дигестора. При взаимодействии концентрированной серной кислоты и азоторганических веществ в присутствии катализатора образуется аммиак, который после обработки смеси щелочью отгоняется и определяется титриметрически. По количеству выделенного аммиака рассчитывают содержание белка.

Анализ данных

Все эксперименты проводились в общей сложности пять раз. Статистический анализ проводился с использованием программного обеспечения Excell. Сравнение влияния факторов проводилось методом со значимостью, проверенной на уровне достоверности 95%, а различия между средними определялись с использованием наименьшей значимой разницы и теста Дункана двухфакторного дисперсионного анализа с одним повторением (ANOVA). Доверительные интервалы, показанные на гистограммах и в таблице, отражают точность используемых методов.

¹ Плешков, Б.П. (1976). Практикум по биохимии растений. Москва: Издательство «Колос».

² Загибалов, А. В., & Зверькова, А. С. (1992). *Технология консервирования плодов и овощей и контроль качества продукции*. Москва: Агропромиздат.

В.В. Мартиросян, М.Н. Костюченко, М.В. Рейнов, О.Е. Тюрина, О.А. Савкина

РЕЗУЛЬТАТЫ

Условия культивирования молочнокислых бактерий и продуцирование экзополисахаридов

Исследовали влияние условий культивирования молочнокислых бактерий на содержание клеток в культуральной жидкости и образование экзополисахаридов (Таблица 2).

Выделенный и высушенный продукт, содержащий ЭПС, взвешивали и определяли его содержание в 1 мл культуральной жидкости (Таблица 2, столбец 4). Определяли соотношение полученных ЭПС и клеток МКБ в куль-

туральной жидкости после 48 часов культивирования (Таблица 2, столбец 5).

Полученные данные показали, что все коллекционные штаммы продуцировали ЭПС в разном количестве. Наибольшее количество выделенного высушенного продукта, содержащего ЭПС в перерасчете на 1 мл культуральной жидкости было определено у штаммов *L.amilolyticus*-2, *L. plantarum*A-63(d), *L.amilolyticus*-1, *L.brevis*-78(d), *L. paracasei*-6, *L.rapi*-1, *L.diolorans*-1. Полученные данные коррелируют с данными другого исследования, в котором отмечается около 30 видов *Lactobacillus* spp., способных синтезировать ЭПС, среди которых также отмечается *Lb. casei*, *Lb. acidophilus*, *Lb. brevis*, *Lb. delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, *Lb. helveticus*, *Lb. plantarum* (Oleksy-Sobczak, 2020)

Таблица 2

Условия культивирования молочнокислых бактерий для продуцирования экзополисахаридов

Table 2

Cultivation Conditions of Lactic Acid Bacteria for Exopolysaccharide Production

Название штамма МКБ	Температура культивирования, °C	Кол-во клеток, ×10 ⁸ КОЕ/мл	Количество выделенного высушенного продукта, содержащего ЭПС, в пересчете на 1 мл культуральной жидкости, мг/мл	Отношение выделенного продукта, содержащего ЭПС, к количеству клеток, мг/(10 ⁸ × КОЕ)	Содержание углеводной основы ЭПС, определенное по методу Дюбуа в выделенном продукте, %	Содержание углеводной основы ЭПС, определенное по методу Бертрона в выделенном продукте, %*	Возможное содержание белков и пептидов, % по массе*
<i>L.brevis</i> -78(d)	30	9,2 ± 0,5a	12,5 ± 0,5a	1,36 ± 0,02a	76,0 ± 0,5a	70,9 ± 0,5a	-
<i>L.casei</i> -1(d)	30	29,0 ± 0,5b	7,8 ± 0,5a	0,27 ± 0,01c	70,9 ± 0,4b	69,5 ± 0,4c	—
<i>L.diolorans</i> -1	37	3,8 ± 0,2c	9,6 ± 0,4c	2,53 ± 0,04d	70,7 ± 0,4b	69,7 ± 0,4c	—
<i>L.brevis</i> -5(d)	30	8,9 ± 0,5a	8,7 ± 0,3d	0,98 ± 0,02e	74,7 ± 0,4c	69,4 ± 0,4c	—
<i>L.fermentum</i> -34 (d)	37	8,5 ± 0,2d	9,9 ± 0,3c	1,16 ± 0,02f	70,3 ± 0,4b	64,9 ± 0,4d	—
<i>L.paracasei</i> -2	37	12,0 ± 0,5e	12,0 ± 0,4a	1,00 ± 0,02e	74,0 ± 0,4d	71,2 ± 0,4b	—
<i>L.paracasei</i> -6	37	7,9 ± 0,5d	11,7 ± 0,5a	1,48 ± 0,02g	72,4 ± 0,4e	70,6 ± 0,4a	—
<i>L.amilolyticus</i> -1	50	5,2 ± 0,5f	12,3 ± 0,5a	2,36 ± 0,02h	67,9 ± 0,4f	65,1 ± 0,4d	—
<i>L. plantarum</i> A-63(d)	30	5,7 ± 0,2f	12,8 ± 0,5a	2,25 ± 0,02i	68,9 ± 0,4g	—	3,1 ± 0,3a
<i>L. paracasei</i> -5	37	35,0 ± 0,5g	11,5 ± 0,3e	0,33 ± 0,01j	73,9 ± 0,4d	—	2,2 ± 0,2b
<i>L. paracasei</i> -4	37	22,0 ± 0,4h	10,0 ± 0,3f	0,45 ± 0,02k	66,2 ± 0,4h	—	2,4 ± 0,2b
<i>L. paracasei</i> -3	37	19,0 ± 0,5i	11,5 ± 0,3e	0,61 ± 0,02l	73,6 ± 0,4i	—	4,8 ± 0,4c
<i>L. paracasei</i> -1	37	13 ± 0,2j	11,6 ± 0,5a	0,89 ± 0,02m	72,1 ± 0,4e	—	1,6 ± 0,1d
<i>L.diolorans</i> -1	37	8,8 ± 0,5a	11,2 ± 0,5e	1,27 ± 0,02n	71,2 ± 0,4e	—	2,4 ± 0,4b
<i>L.amilolyticus</i> -2	50	3,5 ± 0,5c	14,4 ± 0,5g	4,11 ± 0,02o	71,9 ± 0,4j	—	2,8 ± 0,4e
<i>L.rapi</i> -1	30	4,3 ± 0,4c	9,9 ± 0,5f	2,30 ± 0,02p	73,4 ± 0,4i	—	4,2 ± 0,4f

Примечание. * Прочерк означает, что значение показателя не определяли.

a-p = средние значения ± SD в одном столбце с разными строчными надстрочными буквами значительно различаются ($P \leq 0,05$)

Note: * A dash indicates that the value of the parameter was not determined.

a-p = Mean values ± SD in the same column with different lowercase superscript letters differ significantly ($P \leq 0.05$).

Фотометрические определения экзополисахаридов

Выделенный продукт после очистки, помимо ЭПС, может также содержать воду в составе гидратов ЭПС, белки и высокомолекулярные пептиды. Чтобы оценить степень чистоты продукта, необходимо определить содержание ЭПС и оценить содержание белков и пептидов в выделенных продуктах. При определении содержания ЭПС первоначально предполагали, что исследуемые полисахариды образованы преимущественно из остатков глюкозы и моносахаридов, изомерных глюкозе, а также могут содержать незначительное количество остатков глюкуроновой кислоты, аминокислот и остатков сахаров с функциональными группами, такими как ацетильная, пируватная, фосфатная и др. (Sanalibaba, 2016). В примененных методах определения полисахариды гидролизуются до моносахаридов, которые при использовании методов Дюбуа и с применением антронового реактива реагируют с образованием окрашенных продуктов, определяемых фотометрически; а при использовании метода Бертрана реагируют с образованием закиси меди, которая определяется титриметрически. Рассчитывали соответствующее полученным значениям количество глюкозы, умножали на коэффициент пересчета на полисахариды 0,9 и определяли оценочную массу углеводной основы ЭПС. Отличные от остатков глюкозы и ее изомеров структурные звенья полисахаридов (кроме остатков аминокислот) также определяются указанными методами, но из-за особенностей их строения получаемые при анализе значения (оптической плотности, массы восстановленной меди) несколько отличаются от значений при анализе содержания глюкозы и ее изомеров. Однако если таких структурных фрагментов в ЭПС немного, на точность количественного определения ЭПС обозначенными методами существенного влияния они не окажут.

В литературе представлены различные методики определения сахаров с применением фенол-сернокислого метода Дюбуа, различающиеся количеством реагентов, их соотношением и условиями проведения реакции (Masuko, 2005; Rühmann, 2015). Наиболее качественные результаты позволяет получить методика, изложенная в разделе «Материалы и методы исследований». По этой методике получена градуировочная зависимость оптической плотности от концентрации глюкозы с коэффициентом корреляции $R = 1,000$ и незначительным стандартным отклонением $S = 0,0057$ (Рисунок 1).

По данным исследований обнаружено, что даже небольшие отклонения от указанной методики значительно ухудшают характеристики градуировочной кривой и, следовательно, снижают точность определения.

Разброс полученных значений, определенных по методу Дюбуа, оказался от 66,2 до 76 % углеводной основы ЭПС от массы выделенного продукта, среднее содержание составило 71,7 %, стандартное отклонение $S=2,5$, причем значения большинства образцов близки к среднему. Эти показатели свидетельствуют о стабильном процентном содержании в выделенных продуктах ЭПС, произведенных различными штаммами МКБ, что дает возможность оценивать содержание ЭПС в выделенном продукте по его массе, не прибегая к спектрофотометрическому и другим методам определения.

Для оценки корректности результатов, полученных по методу Дюбуа применительно к ЭПС, произведенным МКБ, необходимо сравнить их с результатами, полученными с применением других методов.

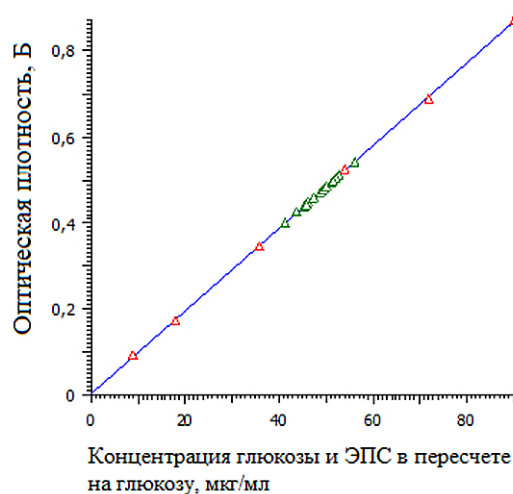
Для определения моносахаридов и полисахаридов часто применяют антроновый метод. По данным Си-

Рисунок 1

Зависимость оптической плотности от концентрации глюкозы

Figure 1

Dependence of Optical Density on Glucose Concentration



Примечание. Формула зависимости: $D = 0,0095624 \cdot C + 0,00115$, где D — оптическая плотность, в Беллах. C — концентрация глюкозы и ЭПС в пересчете на глюкозу, мкг/мл.

Note. The formula for the dependence is: $D=0.0095624 \cdot C+0.00115$, where D is the optical density (in Bel), and C is the concentration of glucose and EPS (calculated as glucose), in $\mu\text{g/mL}$.

нищина³, метод достаточно чувствителен и позволяет определять до 10 мкг/мл сахаров в пробе, поэтому представлялось интересным опробовать его для определения ЭПС, продуцируемых МКБ. Для построения градуировочной зависимости использовали раствор глюкозы в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 26176–91. Получена градуировочная зависимость с коэффициентом корреляции $R = 0,997$ и небольшим стандартным отклонением $S = 0,0068$. Однако результаты определения содержания ЭПС по этому методу оказались почти вдвое ниже результатов, полученных по фенол-серноокислому методу Дюбуа. Поскольку значения содержания ЭПС, определенных по методу Бертрانا (см. следующий абзац), признанного наиболее точным, оказались близкими к значениям, полученным по методу Дюбуа, а приготовление градуировочных растворов нужного состава для корректного определения ЭПС по антроновому методу крайне затруднительно, сделан вывод о его неприменимости для определения ЭПС, произведенных МКБ.

Определение экзополисахаридов методом Бертрана

Универсальным методом титриметрического определения редуцирующих сахаров, в том числе полученных после гидролиза полисахаридов, считается метод Бертрана. По ГОСТ 25832–89 по методу Бертрана определяют общее содержание углеводов в хлебе (включая нерастворимые полисахариды). Таким образом, он признан наиболее универсальным и точным из доступных методов. Недостатками метода Бертрана являются сравнительная трудоемкость и нестехиометрическое соотношение вступившей в реакцию двухвалентной меди и моносахарида. По этой причине содержание сахаров по методу Бертрана определяют с применением эмпирических таблиц или эмпирических формул. В данной работе использовали таблицу соответствия восстановленной меди и глюкозы. Поскольку мономерный состав ЭПС неизвестен, то, используя для сравнения глюкозу, по методу Бертрана нет возможности получить точное значение содержания углеводной основы ЭПС, но поскольку стехиометрия взаимодействия двухвалентной меди и различных моносахаридов отличается несущественно, метод Бертрана дает возможность с хорошей точностью оценить содержание углеводной основы ЭПС.

Метод Бертрана и метод определения белка по Кьельдалю требуют использования большого количества анализируемого вещества, поэтому определить содержание ЭПС по методу Бертрана смогли не во всех выделенных образцах, а только в девяти. Остальные восемь из семнадцати полученных образцов были использованы для определения содержания белка.

Получены значения содержания полисахаридов в диапазоне от 64,9 до 71,3 %, среднее значение составило 69,2 %, на 2,5 % меньше, чем среднее значение по методу Дюбуа. Коэффициент корреляции R для линейной регрессии между полученными значениями определений по Дюбуа и по Бертрану составляет 0,636, что согласно шкале Чеддока говорит о заметной и прямой связи. Хорошее соответствие данных этих двух методов свидетельствует о корректности фенол-серноокислого метода для оценки содержания ЭПС, продуцируемых МКБ разных штаммов при условии введения поправки на завышение: если исходить из того, что метод Бертрана дает оценку, наиболее приближенную к истинному значению, то данные, полученные по методу Дюбуа оказываются несколько завышенными.

Определение остаточного содержания азотсодержащих веществ в выделенных продуктах

Липофильные низкомолекулярные вещества, как и часть гидрофильных, были удалены в результате двойного осаждения спиртом в процессе выделения ЭПС. Оставшиеся низкомолекулярные гидрофильные вещества, в том числе моно- и олигосахариды, были удалены в процессе длительного диализа.

Таким образом, основной примесью в выделенных продуктах могут быть белки и высокомолекулярные пептиды, которые могли частично остаться в растворе после осаждения белков трихлоруксусной кислотой. Содержание белков в выделенных продуктах определяли по методу Кьельдаля, по которому азоторганические вещества разлагаются с образованием аммиака, определяемого титриметрически. Метод не позволяет узнать точное (в пределах погрешности метода измерения) содержание белков и пептидов, но дает возможность оценить содержание белковых веществ. Средняя доля азота в белках составляет около 16 %, исходя

³ Синицын, А. П., Гусаков А. В. & Черноглазов, В. М. (1995). *Биоконверсия лигноцеллюлозных материалов*. Москва: МГУ.

из этого значения и предположения, что наличие фрагментов аминокислот в полученных ЭПС незначительно, мы оценивали содержание белков и пептидов в выделенных продуктах.

Из представленных в Таблице 1 данных видно, что оценочное содержание белковых веществ в выделенных ЭПС незначительно — в среднем составляет 2,9%, причем явной зависимости между содержанием ЭПС и белка в выделенном продукте нет. Возможно, применение сульфосалициловой кислоты в качестве осадителя белков вместо трихлоруксусной кислоты привело бы к более полному осаждению белков и пептидов и, следовательно, меньшему их содержанию в конечном продукте. Однако образование аммиака при обработке проб выделенных продуктов по методу Кьельдаля может быть также обусловлено содержанием остатков аминокислот в качестве структурных фрагментов ЭПС. Таким образом, средний состав выделенных продуктов: около 70% углеводной основы ЭПС, состоящей из остатков моносахаридов, определяемых по методам Дюбуа и Бертрана; около 3% примеси белка, также в эти 3% могут входить азотсодержащие остатки аминокислот, являющимися структурными фрагментами ЭПС. Остатки неопределенными 27–28% массы выделенных продуктов позволяют сделать предположение, что ЭПС, продуцируемые штаммами МКБ, в выделенном виде могут представлять собой устойчивые гидраты, а также содержать увеличивающие массу и искажающие данные анализа по методам Дюбуа и Бертрана функциональные группы, соединенные с остатками моносахаридов, образующими ЭПС.

Из-за указанных особенностей строения ЭПС ни фотометрическими, ни методом Бертрана определить массу ЭПС с точностью до погрешности метода нельзя, для определения точной массы требуется долгие трудоемкие исследования с использованием дорогостоящих методов (ВЭЖХ с масс-спектрометрическим детектором и другие). Однако для практического применения в пищевой промышленности точную массу ЭПС знать не требуется, достаточно лишь ее оценки, что, как показано в настоящем исследовании, успешно достигается методами Дюбуа, Бертрана и гравиметрическим.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты показали, что все исследованные штаммы микроорганизмов (МКБ) при культивировании в солодовом сусле с 12% сухих веществ синтезировали эк-

зополисахариды (ЭПС) в разном количестве. Наибольшее содержание выделенного высушенного продукта было отмечено у штаммов *L. amilolyticus*-2, *L. plantarum* A-63(d), *L. amilolyticus*-1, *L. brevis*-78(d), *L. paracasei*-6, *L. rari*-1 и *L. diolivorans*-1. Эти данные подтверждают выводы других исследований, в которых указано, что ряд видов *Lactobacillus* spp., включая *Lb. casei*, *Lb. acidophilus*, *Lb. brevis*, *Lb. delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, *Lb. helveticus* и *Lb. plantarum*, обладают способностью к синтезу ЭПС (Oleksy-Sobczak, 2020). Данное совпадение свидетельствует о репрезентативности наших результатов.

Фотометрический метод, используемый в исследовании, показал, что содержание углеводной основы ЭПС в выделенных продуктах составляет в среднем 71,7%, что указывает на стабильное производство ЭПС различными штаммами. Однако метод Дюбуа дал завышенные результаты по сравнению с методом Бертрана. Полученные результаты подтверждают данные полученные Ruijsenaars et al. (2000), что фенол-серный метод может иметь завышенный результат, поскольку количественно определяет общее количество углеводов, присутствующих во фракции EPS, включая низкомолекулярные углеводы. Корреляция между результатами этих методов ($R=0,636$) подтверждает, что фенол-сернокислый метод может применяться для оценки содержания ЭПС, однако с учетом поправок.

Метод Бертрана, признанный более точным и универсальным, подтвердил применимость полученных данных, демонстрируя среднее содержание углеводной основы ЭПС 69,2%. Несмотря на сложности его использования, полученные значения коррелировали с результатами метода Дюбуа, что подтверждает возможность использования последнего для практических целей при введении поправок.

Сравнение содержания белковых примесей показало, что в среднем их количество не превышает 2,9%, что соответствует низкому уровню загрязнений. Это подтверждает эффективность выбранного метода очистки. Применение других методов осаждения белков, таких как использование сульфосалициловой кислоты, возможно, позволило бы добиться еще большего удаления белков.

Исследование показывает, что ЭПС, продуцируемые штаммами МКБ, обладают сложным составом, включая примеси, которые могут искажать результаты анали-

за, что коррелируют с данным в литературе (Fukuda, 2010; Amiri, 2019; Oleksy-Sobczak, 2020; Jurášková, 2022). Средний состав ЭПС содержит около 70 % углеводной основы, 3 % белка и остаточные 27–28 % могут включать воду в составе гидратов, а также функциональные группы, соединенные с остатками моносахаридов. Эти особенности подтверждают необходимость использования дополнительных методов для точного определения массы ЭПС.

Ограничения исследования

Использование различных методов определения содержания ЭПС (фенол-сернокислотный метод Дюбуа, антроновый метод и метод Бертрана) имеет свои ограничения по точности. Метод Дюбуа показал завышенные результаты по сравнению с более точным методом Бертрана, что требует внесения поправок при интерпретации данных. Метод Бертрана, хотя и признан более точным, требует больших объемов материала и сложной подготовки проб, что ограничивает его применение для массовых анализов. Антроновый метод показал недостаточную чувствительность в условиях настоящего исследования, делая его применение менее надежным для определения ЭПС, продуцируемых молочнокислыми бактериями (МКБ).

Тщательная очистка продуктов с использованием трихлоруксусной кислоты могла быть недостаточной для полного удаления белков и высокомолекулярных пептидов, что могло повлиять на точность анализа. Применение других осадителей, таких как сульфосалициловая кислота, могло бы улучшить очистку, но не было протестировано. Исследование базировалось на предположении, что полисахариды состоят преимущественно из остатков глюкозы и ее изомеров, однако присутствие других функциональных групп и остатков сахаров могло исказить результаты анализа.

Процесс пробоподготовки с использованием вакуумного испарения и диализа мог привести к неполному удалению нежелательных примесей, что влияет на чистоту и однородность исследуемого продукта. Многоступенчатая пробоподготовка, включая центрифугирование, диализ и упаривание, увеличивает риск потери материала и возможных изменений в составе ЭПС, что могло сказаться на итоговых результатах.

Все штаммы МКБ культивировались при оптимальной температуре, что не учитывает возможные изменения

синтеза ЭПС при других условиях культивирования, ограничивая интерпретацию и применимость результатов. Определение содержания белка по методу Кьельдаля позволяло лишь оценить общее количество азотсодержащих соединений, не отделяя вклад белков от аминосахаров, что могло повлиять на оценку чистоты выделенных ЭПС. Использование эмпирических таблиц при расчетах содержания восстанавливающих сахаров по методу Бертрана также ограничивало точность полученных результатов.

Исследование проводилось на штаммах молочнокислых бактерий из музейной коллекции, что ограничивает возможность обобщения выводов на другие виды и штаммы бактерий. Способность синтезировать ЭПС может различаться у других штаммов, что требует дополнительных исследований.

Эти ограничения не компрометируют результаты исследования по ряду причин. Во-первых, несмотря на ограничения отдельных методов, исследование использовало несколько различных методов для определения содержания ЭПС, что позволило подтвердить результаты с разных точек зрения. Хотя метод Дюбуа может давать завышенные результаты, его сопоставление с более точным методом Бертрана показало, что фенол-сернокислый метод применим с учетом поправок. Согласованность результатов между этими методами свидетельствует о достаточной точности для практических целей, таких как применение в пищевой промышленности.

Во-вторых, несмотря на возможное остаточное содержание белков и пептидов, их количество было минимальным и не имело значительного влияния на общую оценку содержания ЭПС. Это подтверждается низкой средней долей белка (около 3 %), что позволяет считать анализ чистоты продукта приемлемым. Даже если бы применение других осадителей могло улучшить очистку, результаты с учетом примененного метода всё равно обеспечивают надёжную оценку содержания полисахаридов.

Процесс пробоподготовки, хотя и многозадачен, был тщательно выполнен и включал стандартные методики, что минимизировало возможные ошибки и гарантировало повторяемость результатов. Использование нескольких этапов подготовки и анализов обеспечило получение надежных данных, несмотря на возможные потери материала или присутствие примесей.

Температурные условия культивирования были выбраны с учетом оптимальных параметров для каждого штамма, что обеспечило репрезентативность полученных данных для условий исследования. Это даёт уверенность, что полученные результаты отражают реальный потенциал производства ЭПС штаммами МКБ в подобных условиях.

Ограничения количественного анализа по методу Кьельдаля не повлияли на основные выводы исследования, так как вклад азотсодержащих остатков был незначительным. Основные результаты фокусировались на углеводной основе ЭПС, и методика определения белков служила лишь дополнительной характеристикой, а не ключевым параметром.

Использование штаммов из музейной коллекции ограничивает обобщаемость результатов, но эти штаммы представляют промышленно-ценные культуры, используемые в хлебопекарной промышленности, что делает результаты ценными для практических применений. Даже если другие штаммы могут показывать различия в синтезе ЭПС, это не умаляет важности изученных штаммов и выводов относительно их продуктивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования способности штаммов молочнокислых бактерий, из коллекции ФГАНУ НИИХП продуцировать экзополисахариды. Определены наиболее продуктивные штаммы: *L. amilolyticus*-2, *L. plantarum*A-63(d), *L. amilolyticus*-1, *L. brevis*-78(d), *L. paracasei*-6. Средние результаты показали штаммы *L. rapi*-1, *L. diolivorans*-1. Полученные данные показывают, что исследуемые штаммы из коллекции ФГАНУ НИИХП обладают потенциалом в качестве источников ЭПС при производстве заквасок и могут быть использованы для разработки микробных консорциумов для хлебопекарной промышленности, позволяющих улучшить реологические свойства, сжимаемость мякиша, удельный объем хлеба и снизить крошковатость и скорость черствения.

Сравнения методов определения ЭПС показали, что для определения содержания ЭПС продуцируемых при культивировании на солодовом сусле промышленно-ценными МКБ для хлебопекарной промышленности, корректным является метод Дюбуа. Для оценки содержания ЭПС можно использовать гравиметрический метод, не прибегая к более трудоемким спектрофото-

метрическому или иным методам определения содержания ЭПС.

Дальнейшим направлением работ по исследованию продуцирования ЭПС промышленно-ценными МКБ видится подбор оптимальных условий для получения ЭПС с наибольшим выходом и оптимизация методики выделения ЭПС.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Владимир Владимирович Мартиросян: концептуализация; разработка методологии исследования; руководство исследованием; администрирование проекта.

Марина Николаевна Костюченко: курирование данных; написание — подготовка черновика рукописи; администрирование проекта.

Михаил Викторович Рейнов: проведение исследования; создание рукописи и её редактирование; формальный анализ.

Ольга Евгеньевна Тюрина: визуализация; проведение исследования; написание — подготовка черновика рукописи; верификация данных.

Олеся Александровна Савкина: создание рукописи и её редактирование; администрирование и верификация данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Vladimir V. Martirosyan: conceptualization; development of research methodology; research management, project administration.

Marina N. Kostyuchenko: data curation; writing — preparation of a draft manuscript; project administration.

Mikhail V. Reynov: conducting the study; creating and editing the manuscript; formal analysis.

Olga E. Tyurina: visualization, conducting the study; writing — preparation of a draft manuscript; data verification.

Olesya A. Savkina: creating and editing the manuscript; data administration and verification.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Абрамова, А.Л. (2009). Методы определения экзополисахаридов (ЭПС). *Научное обеспечение молочной промышленности (ВНИМИ — 80 лет)* (с. 8–12). Москва: ВНИМИ.
- Abramova, A.L. (2009). *Methods for Determining Exopolysaccharides (EPS). Scientific support for the dairy industry (VNIIMI — 80 years)* (p. 8–12). Moscow: All-Russian Scientific Institute of Dairy Industry.
- Винокуров, В. А., Грайфер, В. И., Гринберг, Т. А., Пирог, Т. П., Владимиров, А. И., & Исмаилов, А. М. (2004). *Способ получения экзополисахаридов* (Патент РФ № 2 241 037). Российское патентное ведомство. Опубликовано 27.11.2004, Бюл. № 33.
- Vinokurov, V. A., Graipher, V. I., Grinberg, T. A., Pirog, T. P., Vladimirov, A. I., & Ismagilov, A. M. (2004). *Method for obtaining exopolysaccharides* (Patent No. RU 2,241,037). Russian Patent Office. Published 27.11.2004, Bulletin No. 33.
- Григорьев, Е. Ф., Болоховская, В. А., Халабузарь, В. Г., Кравец, Л. Ф., Дерябин, В. В., & Бовина, Е. В. (1990). *Способ выделения экзополисахаридов* (Патент СССР № 1 549 996). Патентное ведомство СССР. Опубликовано 15.03.1990.
- Grigoriev, E. F., Bolohovskaya, V. A., Halabuzar, V. G., Kravets, L. F., Deryabin, V. V., & Bovina, E. V. (1990). *Method for isolation of exopolysaccharides* (Patent No. SU 1,549,996). Soviet Patent Office. Published 15.03.1990.
- Еникеев, Р. Р., Бобошко, Д. Н., Руденко, Е. Ю., & Зимичев, А. В. (2011). *Способ количественного анализа полисахарида, производимого молочнокислыми бактериями* (Патент РФ № 2 437 092). Российское патентное ведомство. Опубликовано 20.12.2011, Бюл. № 35.
- Enikeev, R. R., Boboshko, D. N., Rudenko, E. Yu., & Zimichev, A. V. (2011). *Method for quantitative analysis of a polysaccharide produced by lactic acid bacteria* (Patent No. RU 2,437,092). Russian Patent Office. Published 20.12.2011, Bulletin No. 35.
- Кичемазова, Н.В. (2019). Экзополисахариды бактерий родов *Xanthobacter* и *Ancylobacter*: характеристика и их биологические свойства [Диссертация на соиск. уч. ст. к. биол. н.]. ФГБОУ ВО Вавиловский Университет.
- Kichemazova, N. V. (2019). *Exopolysaccharides of bacteria of the genera Xanthobacter and Ancylobacter: Characteristics and their biological properties* [Unpublished doctoral dissertation]. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vavilov University.
- Куис, Л. В., & Маркевич, Р. М. (2009). Выделение, фракционирование и анализ экзополисахаридов *Bacillus mucilaginosus*. *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология* (с. 170–173). Минск: БГТУ.
- Kuis, L. V., & Markevich, R. M. (2009). Allocation, clearing, fractionation and studying exopolysaccharides of *Bacillus mucilaginosus*. *Trudi BGTU. Ser. 2: Chemical technologies, biotechnology, geoeology* (p.170–173). Minsk: BSTU.
- Локачук, М. Н., Савкина, О.А., Павловская, Е. Н., Фролова, Ю.М., Костюченко, М.Н., & Мартиросян, В. В. (2023). Современная таксономия и разнообразие молочнокислых бактерий в заквасках. *Хлебопродукты*, (6), 28–35. <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2023-32-6-28-35>
- Lokachuk, M. N., Savkina, O.A., Pavlovskaya, E. N., Frolova, Yu.M., Kostyuchenko, M. N., & Martirosyan, V.V. (2023). Modern taxonomy and diversity of sourdough lactobacilli, *Khleboproducty*, (6), 28–35. <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2023-32-6-28-35>
- Фокина, Н.А. (2015). Экзополисахарид *Streptococcus Thermophilus*: условия выделения и свойства. *Актуальная биотехнология*, 14(3), 41–42.
- Fokina, N. A. (2015). Exopolysaccharide of *Streptococcus Thermophilus*: Isolation conditions and properties. *Aktualnaja Biotehnologija*, 14(3), 41–42.
- Хусаинов, И.А. (2014). Современные представления о биосинтезе бактериальных экзополисахаридов. *Вестник Казанского технологического университета*, 17(5), 167–172.
- Khusainov, I.A. (2014). Modern concepts of the biosynthesis of bacterial exopolysaccharides. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 17(5), 167–172.
- Amiri, S., Rezaei Mokarram, R., Sowti Khiabani, M., Rezazadeh Bari, M., & Alizadeh Khaledabad, M. (2019). Exopolysaccharides production by *Lactobacillus acidophilus* LA5 and *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BB12: Optimization of fermentation variables and characterization of structure and bioactivities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123, 752–765. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.084>
- Cerning, J., Bouillanne, C., & Desmazeaud, M. J. (1988). Exocellular polysaccharide production by *Streptococcus thermophiles*. *Biotechnology Letters*, 10, 255–260. <https://doi.org/10.1007/BF01024415>
- Daba, G. M., Elnahas, M. O., & Elkhateeb, W. A. (2021). Contributions of exopolysaccharides from lactic acid bacteria as biotechnological tools in food, pharmaceutical, and medical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 173, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.01.110>
- Das, L., Raychaudhuri, U., & Chakraborty, R. (2015). Effects of hydrocolloids as texture improver in coriander bread. *Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 3671–3680. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1296-8>

- Dilna, S. V., Surya, H., Aswathy, R. G., Varsha, K. K., Sakthikumar, D. N., Pandey, A., & Nampoothiri, K. M. (2015). Characterization of an exopolysaccharide with potential health-benefit properties from a probiotic *Lactobacillus plantarum* RJF4. *LWT — Food Science and Technology*, 64(2), 1179–1186. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.040>
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Galle, S., Schwab, C., Arendt, E., & Gänzle, M. (2010). Exopolysaccharide-forming *Weissella* strains as starter cultures for sorghum and wheat sourdoughs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(9), 5834–5841. <https://doi.org/10.1021/jf1002683>
- Goh, K. K. T., Haisman, D. R., Archer, R. H., & Singh, H. (2005). Evaluation and modification of existing methods for the quantification of exopolysaccharides in milk-based media. *Food Research International*, 38(6), 605–613. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.11.014>
- Jurášková, D., Ribeiro, S. C., & Silva, C. C. G. (2022). Exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria: From biosynthesis to health-promoting properties. *Foods*, 11(2), 156. <https://doi.org/10.3390/foods11020156>
- Katina, K., Maina, N. H., Juvonen, R., Flander, L., Johansson, L., Virkki, L., Tenkanen, M., & Laitila, A. (2009). In situ production and analysis of *Weissella confusa* dextran in wheat sourdough. *Food Microbiology*, 26(7), 734–743. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.07.008>
- Kavita, D., Devi, P. B., Singh, S. P., & Shetty, P. H. (2016). Characterization of a novel galactan produced by *Weissella confusa* KR780676 from an acidic fermented food. *International Journal of Biological Macromolecules*, 86, 681–689. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.099>
- Kim, Y., Oh, S., Yun, H. S., Oh, S., & Kim, S. H. (2010). Cell-bound exopolysaccharide from probiotic bacteria induces autophagic cell death of tumour cells. *Letters in Applied Microbiology*, 51(2), 123–130. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2010.02859.x>
- Korcz, E., & Varga, L. (2021). Exopolysaccharides from lactic acid bacteria: Techno-functional application in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 375–384. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.014>
- Masuko, T., Minami, A., Iwasaki, N., Majima, T., Nishimura, S., & Lee, Y. C. (2005). Carbohydrate analysis by a phenol-sulfuric acid method in microplate format. *Analytical Biochemistry*, 339(1), 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2004.12.001>
- Moroni, A. V., Arendt, E. K., & Dal Bello, F. (2011). Biodiversity of lactic acid bacteria and yeasts in spontaneously-fermented buckwheat and teff sourdoughs. *Food Microbiology*, 28(3), 497–502. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.10.016>
- Nguyen, P. T., Nguyen, T. T., Bui, D. C., Hong, P. T., Hoang, Q. K., & Nguyen, H. T. (2020). Exopolysaccharide production by lactic acid bacteria: The manipulation of environmental stresses for industrial applications. *AIMS Microbiology*, 6(4), 451–469. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2020027>
- Oleksy-Sobczak, M., Klewicka, E., & Piekarska-Radzik, L. (2020). Exopolysaccharides production by *Lactobacillus rhamnosus* strains — Optimization of synthesis and extraction conditions. *LWT*, 122, 109055. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109055>
- Patel, S., Majumder, A., & Goyal, A. (2012). Potentials of exopolysaccharides from lactic acid bacteria. *Indian Journal of Microbiology*, 52(1), 3–12. <https://doi.org/10.1007/s12088-011-0148-8>
- Prete, R., Alam, M. K., Perpetuini, G., Perla, C., Pittia, P., & Corsetti, A. (2021). Lactic acid bacteria exopolysaccharides producers: A sustainable tool for functional foods. *Foods*, 10, 1653. <https://doi.org/10.3390/foods10071653>
- Piermaria, J. A., De La Canal, M. L., & Abraham, A. G. (2008). Gelling properties of kefir, a food-grade polysaccharide obtained from kefir grain. *Food Hydrocolloids*, 22, 1520–1527. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.10.005>
- Ruhmkorf, C., Jungkuntz, S., Wagner, M., & Vogel, R. F. (2012). Optimization of homoexopolysaccharide formation by lactobacilli in gluten-free sourdoughs. *Food Microbiology*, 32(2), 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.07.002>
- Rühmann, B., Schmid, J., & Sieber, V. (2015). Methods to identify the unexplored diversity of microbial exopolysaccharides. *Frontiers in Microbiology*, 6, 565. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00565>
- Ruijsenaars, H. J., Stingle, F., & Hartmans, S. (2000). Biodegradability of food-associated extracellular polysaccharides. *Current Microbiology*, 40, 194–199.
- Ryan, P. M., Ross, R. P., Fitzgerald, G. F., Caplice, N. M., & Stanton, C. (2014). Sugar-coated: Exopolysaccharide producing lactic acid bacteria for food and human health applications. *Food & Function*, 6(3), 679–693. <https://doi.org/10.1039/C4FO00529E>
- Sanalibaba, P., & Çakmak, G. A. (2016). Exopolysaccharides production by lactic acid bacteria. *Applied Micro Open Access*, 2, 1000115. <https://doi.org/10.4172/2471-9315.1000115>
- Zajsek, K., Gorsek, A., & Kolar, M. (2013). Cultivating conditions effects on kefir production by the mixed culture of lactic acid bacteria imbedded within kefir grains. *Food Chemistry*, 139(1–4), 970–977. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.142>
- Zarour, K., Vieco, N., Pérez-Ramos, A., Nacher-Vázquez, M., Mohedano, M. L., & López, P. (2017). Food ingredients synthesized by lactic acid bacteria. In *Microbial production of food ingredients and additives* (pp. 89–124). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811520-6.00004-0>

Концептуальный подход к конструированию продуктов энтерального питания

Е.Ю. Агаркова, В.В. Кондратенко, Н.С. Пряничникова

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

Корреспонденция:
Евгения Юрьевна Агаркова,
E-mail: e_agarkova@vnimi.org

Конфликт интересов:
авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 20.04.2024
Принята: 16.12.2024
Опубликована: 27.12.2024

Финансирование:
Исследования проведены
в рамках государственного
задания Министерства науки
и высшего образования
Российской Федерации
FNSS-2022-0006 «Исследование
функционального потенциала
национальных молочных
продуктов для формирования
их идентификационных матриц,
интегрируемых в глобальные
базы данных».

Copyright: © 2024 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение: Нутритивная поддержка является важным компонентом базисного лечения различных патологических состояний. Однако в настоящее время разработка формулы продукта энтерального питания носит частный точечный характер без единой методологии, что делает каждую такую разработку эксклюзивной и весьма дорогостоящей. Анализ существующих подходов к конструированию продуктов ЭП в связи со специфичностью их использования обнаружил ряд проблем, связанных с ограничениями применимости. В этой связи в условиях сложившейся геополитической обстановки разработка унифицированного подхода к созданию спектра специализированных продуктов, в том числе энтерального питания (ЭП), является актуальной задачей.

Цель: Разработать принципиально новую концепцию конструирования продуктов ЭП, основанную на конъюгации системы цифрового профилирования от сырья до реципиента с базовыми положениями пищевой комбинаторики и модульностью технологии.

Материалы и методы: В качестве объектов исследования выступал пул информации о существующих подходах к конструированию продуктов ЭП, базовых принципах пищевой комбинаторики и цифрового профилирования. Разработку принципа модульности технологической трансформации ингредиентов в продукт ЭП проводили с использованием модифицированной функции желательности Харрингтона с введением цифрового профиля ингредиентов.

Результаты: В статье рассмотрены основные виды проектирования продукции: базовая пищевая комбинаторика, цифровое профилирование и расширенное цифровое профилирование с учетом трансформации нутриентов в процессе производства, выявлены их позитивные и негативные стороны применительно к ЭП и разработан новый подход к конструированию продуктов ЭП, Предложен новый концептуальный подход к конструированию продуктов ЭП на основе комплексного рационального цифрового профилирования с учётом принципов модульности технологической трансформации ингредиентов в готовый продукт.

Выводы: В существующем виде механизм проектирования продуктов ЭП не позволяет унифицировать процесс их создания, что в условиях ухода зарубежных компаний-разработчиков с отечественного рынка создаёт риск возникновения недостаточности обеспечения отечественной медицины данными продуктами. Предложенный концептуальный подход в первом приближении позволяет решить данную проблему, в том числе, и в части применимости пищевой комбинаторики. Разработка является основополагающим вектором для проведения дальнейших научных исследований в данной области.

Ключевые слова: энтеральное питание; нутритивная поддержка; пищевые комбинаторные технологии; цифровое профилирование нутриентов; модульные технологии трансформации ингредиентов; разработка специализированных продуктов питания



Для цитирования: Агаркова, Е. Ю., Кондратенко, В. В., & Пряничникова, Н. С. (2024). Концептуальный подход к конструированию продуктов энтерального питания. *FOOD METAENGINEERING*, 2(4), 26–35. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.4.74>

Conceptual Approach to the Design of Enteral Nutrition Products

Evgeniya Yu. Agarkova, Vladimir V. Kondratenko, Nataliya S. Pryanichnikova

All-Russian Dairy Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: Nutritional support is a vital component of the basic treatment for various pathological conditions. However, the current development of formulas for enteral nutrition products is carried out in a fragmented and case-specific manner, lacking a unified methodology. This makes each development unique and significantly expensive. An analysis of existing approaches to the design of enteral nutrition (EN) products, considering the specificity of their use, has revealed several issues related to their applicability. In this context, given the current geopolitical situation, the development of a unified approach to creating a range of specialized products, including enteral nutrition (EN), has become a pressing challenge.

Purpose: To develop a fundamentally new concept for designing EP (functional food) products, based on the integration of a digital profiling system from raw materials to the recipient with the basic principles of food combinatorics and the modularity of technology.

Materials and Methods: The research objects included a pool of information on existing approaches to the design of EP (functional food) products, the basic principles of food combinatorics, and digital profiling. The development of the principle of modularity in the technological transformation of ingredients into an EP product was carried out using a modified Harrington desirability function, incorporating the digital profile of the ingredients.

Results: The article examines the main types of product design: basic food combinatorics, digital profiling, and extended digital profiling that accounts for nutrient transformations during production. Their positive and negative aspects in relation to EN are identified, and a new approach to the design of EN products is proposed. A novel conceptual approach to EN product design is introduced, based on comprehensive rational digital profiling that considers modular principles of technological transformation of ingredients into the final product.

Conclusion: The current mechanism for designing EN products does not allow for the unification of their development processes. This creates a risk of insufficient supply of such products to domestic healthcare in the context of the withdrawal of foreign developers from the domestic market. The proposed conceptual approach provides a preliminary solution to this problem, including its applicability to food combinatorics. This development serves as a foundational direction for further scientific research in this area.

Keywords: enteral nutrition; nutritional support; food combinatorics technologies; digital nutrient profiling; modular technologies for ingredient transformation; development of specialized food products

Correspondence:

Evgeniya Yu. Agarkova,
E-mail: e_agarkova@vnimi.org

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 20.04.2024

Accepted: 16.12.2024

Published: 27.12.2024

Funding:

The research was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FNSS-2022-0006 "Study of the functional potential of national dairy products for the formation of their identification matrices integrated into global databases."

Copyright: © 2024 The Authors



To cite: Agarkova, E. Yu., Kondratenko, V. V., & Pryanichnikova, N. S. (2024). Conceptual approach to the design of enteral nutrition products. *FOOD METAENGINEERING*, 2(4), 26–35. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.4.74>

ВВЕДЕНИЕ

Результаты многочисленных исследований в области нутритивной терапии подтверждают важность проведения нутритивной поддержки, то есть обеспечения такими необходимыми специализированными продуктами, как энтеральные¹ (Barbalho et al., 2020; Derosa, D'Angelo, Maffioli, 2020; Murphy et al., 2024; Talavera, 2023). Мнение большинства специалистов медицинских учреждений сводится к тому, что данная терапия благоприятно сказывается на здоровье больного в целом, препятствует истощению организма после тяжёлых оперативных вмешательствах (Bear et al., 2021; Cass & Charlton, 2022; Correia et al., 2017; Gillis & Wischmeyer, 2019; Ignowski et al., 2018; Kashiwagi et al., 2024).

Российский рынок специализированного лечебного питания, в том числе энтерального, сегодня, к сожалению, на 96 % перекрывается за счет импорта, на 1 % за счет поставок из Белоруссии (Агаркова & Шерстнева, 2024), а доля отечественной продукции составляет 3 % от общего объема потребления, в то время как емкость рынка оценивается в 30 млрд. руб.² Наполнение рынка продукцией ЭП отечественного производства, разработанными с применением современных научных подходов, — приоритетная задача российской пищевой промышленности³ (Луфт и соавт., 2017; Обухова и соавт., 2022). Необходимо понимать, что скопировать импортные продукты достаточно сложно: подавляющее большинство смесей имеет запатентованные формулы, то есть состав готового продукта указан в маркировке, но конкретные наименования используемых компонентов и их рецептурное соотношение неизвестно (Correia et al., 2017; Gillis & Wischmeyer, 2019; Ignowski et al., 2018; Mohajir et al., 2022). Второй проблемой является трансформация некоторых веществ в процессе технологической обработки и хранения, что ведет к необходимости установления баланса между необходимыми для решения медицинских задач веществами ЭП (Bear et al., 2021; Ekici et al., 2024; Inciong et al., 2020), указанными в маркировке продукта значениями этих веществ, и установленным в рецептуре количеством ингредиентов (Тутельян, 2020).

В настоящее время в пищевой промышленности применяют три основных вида проектирования продуктов:

- (1) базовая пищевая комбинаторика — метод конструирования новых пищевых продуктов посредством введения пищевых и биологически активных добавок для достижения необходимых органолептических, физико-химических и иных характеристик (Липатов, 1995).
- (2) цифровое профилирование — создание математической модели продукта (цифрового профиля), включающего матрицы ингредиентов и нутриентного состава, а также физико-химических, органолептических и иных свойств продукта (Семипятный, 2021).
- (3) расширенное цифровое профилирование с учётом трансформации нутриентов в процессе производства — разработка комплексных математических моделей, отвечающих на воздействия виртуальных факторов аналогично, как сам продукт отвечал бы на воздействие реальных факторов.

Исследование существующих подходов к конструированию пищевых систем в целом и продуктов ЭП в частности показало, что в подавляющем большинстве в их основе лежит принцип пищевой комбинаторики Липатова (Липатов, 1995; Липатов & Рогов, 1987), базирующийся на классической теории сбалансированного питания с учётом современных её вариаций — теорий адекватного, оптимального и функционального питания⁴. В основу вышеупомянутого принципа пищевой комбинаторики положено априорное представление, что основным целевым назначением пищевых продуктов является обеспечение поддержания в организме человека условного оптимального материального и энергетического баланса. Практическая реализация представляет собой алгоритм определения сочетания исходных ингредиентов, из которых будет произведён продукт с известными данными о химическом составе каждого из них, с учётом требований к сочетанию нутриентов в конечном продукте на фоне ряда граничных условий, формируемых посредством целевых особенностей конструируемого продукта и его потребительских свойств. Однако такой подход не учитывает изменения, происходящие с хими-

¹ Рыжкова, О. В. (2022). Энтеральное и парентеральное питание: Учебное пособие. Иркутск: ИГМУ.

² Эксперт оценил долю российской продукции на рынке спецпитания РФ: 2022. <https://www.interfax.ru/business/842790>

³ Рыжкова, О. В. (2022). Энтеральное и парентеральное питание: Учебное пособие. Иркутск: ИГМУ.

⁴ Забодалова, Л. А. (2015). Научные основы создания продуктов функционального назначения: Учебно-методическое пособие. СПб: Университет ИТМО.

ческими компонентами исходных ингредиентов в процессе ряда технологических операций, необходимых для трансформации исходного сырья в конечный продукт. Необходимость включения динамики компонентов в процессе технологической трансформации в принцип пищевой комбинаторики находит отражение в работах по данной тематике (Oganesyants, 2020; Семипятный, 2017; Хуршудян & Рябова, 2021).

В последние несколько лет вектор исследований в области пищевой комбинаторики начал смещаться в сторону цифрового профилирования конструируемого продукта с созданием так называемого цифрового двойника (Семипятный, 2021). Он представляет собой цифровой профиль продукта, включающий наряду с матрицей состава основных и второстепенных нутриентов, сопутствующих компонентов и компонентов-маркеров принадлежности или свойств, также матрицы физико-химических и органолептических параметров, и метаданные, характеризующие продукт. Таким образом, в процессе конструирования продукта оперирование проходит с комплексной математической моделью, отвечающей на воздействия виртуальных факторов аналогично тому, как сам продукт отвечал бы на воздействие реальных факторов. Особенностью такого подхода является многопараметрический контроль соответствия цифрового профиля продукта матрице «идеализированного отпечатка» (Семипятный, 2021). Подобное цифровое профилирование потенциально позволяет гибко моделировать формирование свойств конструируемого продукта с учётом каскада технологических качественных и количественных преобразований. Такой вариант совершенствования подхода к пищевой комбинаторике позволяет итеративно приближать цифровой профиль получающегося продукта к результату, удовлетворяющему некоторой контрольной матрице, формирующей множество допустимых девиаций целевых свойств.

Несмотря на все преимущества, в реализации цифрового профилирования конструируемого продукта с созданием цифрового двойника имеет место ряд проблем ограниченной применимости при конструировании продуктов ЭП, следствием чего является необходимость совершенствования вышеописанного подхода цифрового профилирования и пищевой комбинаторики с гибкой двусторонней связкой проектируемого продукта и модульных технологий.

Целью текущего исследования являлось разработка принципиально новой концепции конструирования продуктов ЭП, основанной на конъюгации системы цифрового профилирования от сырья до реципиента с базовыми положениями пищевой комбинаторики и модульностью технологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объектами исследования выступал пул информации о существующих подходах к конструированию продуктов ЭП, видах продуктов, требованиях, предъявляемых к ним, базовых принципах пищевой комбинаторики и цифрового профилирования.

Процедура исследования

Усовершенствование принципов пищевой комбинаторики осуществляли основываясь на существующих представлениях о цифровом профилировании (Семипятный, 2021; Oganesyants, 2023; Oganesyants, 2020) и направлениях его применения, а также принципов пищевой комбинаторики (Липатов, 1995; Липатов & Рогов, 1987).

Разработку принципа модульности технологической трансформации ингредиентов в продукт ЭП проводили с использованием модифицированной функции желательности Харрингтона с введением цифрового профиля ингредиентов (Галстян, 2009).

Разработку схемы принципа комбинаторной модульности технологического процесса основывали на обработке принципов модульности, полученных на предыдущем этапе работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Усовершенствование принципов пищевой комбинаторики

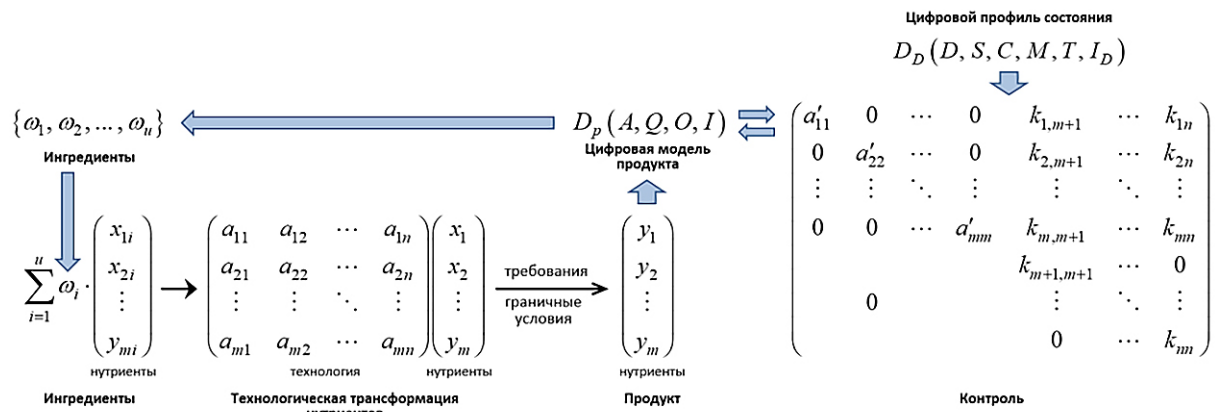
В связи с ограниченной применимостью существующих методов проектирования пищевых систем к продуктам ЭП в структуру пищевой комбинаторики введём понятие цифрового профиля состояния (Рисунок 1), отражающего состояние пациента как субъекта, нуждающегося в адекватной нутритивной и энергетической поддержке.

Рисунок 1

Усовершенствованный вариант пищевой комбинаторики

Figure 1

Enhanced Version of Food Combinatorics



Примечание.

A — базовая матрица продукта; Q — матрица физико-химических параметров; O — матрица органолептических показателей; I — кортеж метаданных; ω — массовая доля ингредиента; x — массовая доля нутриента; y — массовая доля нутриента в продукте; a — коэффициент технологической трансформации; a' — эталонное значение; i — индекс; m — количество строк матриц; n — количество столбцов матриц; u — количество ингредиентов; k — коэффициент; D — нутритивные факторы болезни, Q — нутритивные факторы осложнения, O — нутритивные факторы состояния, I_d — кортеж метаданных, T — временные факторы нутритивной и энергообеспеченности.

Note.

A — base product matrix; Q — matrix of physicochemical parameters; O — matrix of organoleptic characteristics; I — metadata tuple; ω — ingredient mass fraction; x — nutrient mass fraction; y — nutrient mass fraction in the product; a — technological transformation coefficient; a' — reference value; i — index; m — number of matrix rows; n — number of matrix columns; u — number of ingredients; k — coefficient; D — disease-related nutritional factors; Q — complication-related nutritional factors; O — condition-related nutritional factors; I_d — metadata tuple; T — temporal factors of nutritional and energy provision.

Пусть цифровой профиль состояния включает в себя базовую матрицу нутритивных факторов болезни (D), коррекционную матрицу возраста пациента (S), матрицу нутритивных факторов сопутствующих осложнений (C), матрицу нутритивных факторов текущего физиологического состояния (M), матрицу временных факторов нутритивной и энергообеспеченности (T), метаданные (I_d). При конструировании продуктов ЭП цифровой профиль состояния неизбежно является базой, определяющей требования к форме и свойствам продукта, а также комплекс граничных условий. Следствием этого является необходимость дополнения существующего цифрового профиля продукта включением в кортеж его метаданных форм-фактора продукта. Таким образом, цифровой профиль состояния становится эссенциальной составляющей конструирования продуктов ЭП.

В результате анализа взаимодействия цифрового профиля продукта как элемента существующего подхода к пищевой комбинаторике и введенного нами цифро-

вого профиля состояния была установлена его слабая детерминированность. Для адаптации существующего подхода к пищевой комбинаторике для конструирования продуктов ЭП необходимо обеспечение жёсткой детерминированности между введённым нами цифровым профилем состояния и цифровым профилем продукта.

Второй проблемой применимости существующих подхода является эмпирическая ориентированность на установление допустимых интервалов значений в матрицах физико-химических и органолептических показателей в соответствии с принципом желательности Харрингтона, следствием чего является детерминированность этих интервалов только в форме граничных условий для определения *post factum*. Для решения этой проблемы необходимо сами физико-химические показатели представить не в дискретной форме, а в виде многопараметрической функции от компонентного состава $Q_j = f_{Q_j}(A)$. В свою очередь органолептические показатели представим в виде много-

параметрической функции от компонентного состава и от физико-химических свойств $O_j = f_{O_j}(A, f_Q)$. Данный подход основан на априорном представлении о формировании физико-химических и органолептических свойств продукта как производных от состава и соотношения компонентов. Тогда цифровой профиль продукта будет включать в себя не матрицы физико-химических параметров и органолептических показателей, а соответствующие матрицы их функций: $D_p = (A, f_Q, f_O, I)$. Отсюда логически вытекает третья проблема применимости — необходимость включения физико-химических параметров и органолептических показателей в виде соответствующих функций в пул оперативных факторов пищевой комбинаторики с допустимыми коридорами варьирования, задаваемыми ограничительными значениями частных функций желательности Харрингтона, *in situ*. Естественным препятствием к функциональной реализации предложенного варианта является достаточно малая либо фрагментарная изученность численных зависимостей физико-химических параметров и органолептических показателей от компонентного комплекса продукта, что является поводом для исследований в данном направлении. Подобный скорректированный подход становится рабочим, при условии учёта каскадов преобразований компонентов пула задействованных в комбинаторике ингредиентов. Однако, на сегодняшний момент само существование матрицы технологических трансформаций как цифровое отражение количественных и качественных преобразований в процессе переработки ингредиентов в готовый продукт ЭП носит скорее декларативную форму, что является четвёртой проблемой применимости существующего подхода.

Учитывая вариативность компонентного состава и физико-химических параметров, используемых при производстве ЭП ингредиентов, для полноты операционной манёвренности возникает необходимость введения цифрового профиля ингредиентов $D_s = (A_s, Q_s, B, I_s)$,

включающего по аналогии с цифровым профилем продукта базовую матрицу сырья (A_s), матрицу физико-химических параметров (Q_s), матрицу микробиологических показателей (B) и кортеж метаданных (I_s). При этом в силу нативной детерминированности ингредиентов все матрицы могут включать только дискретные значения.

Принцип модульности технологии ЭП

Следует учитывать, что технологическая трансформация ингредиентов в готовый продукт ЭП представляет собой каскад преобразований компонентов практически в каждом технологическом процессе. В соответствии с этим введем принцип модульности технологической трансформации ингредиентов в продукт ЭП, в соответствии с которым совокупность последовательности процессов может состоять не более чем из трёх групп-модулей (Рисунок 2).

Первая группа процессов (модуль 1) по большей части детерминирована физико-химическими параметрами исходных ингредиентов. В свою очередь завершающая — третья группа — детерминирована свойствами конечного продукта ЭП (модуль 3). В силу необходимой истинной или квазинепрерывности передела S в P имеет место некоторая условная граница в общей цепи технологических процессов, формально отделяющая один модуль от другого. В отдельных случаях можно рассмотреть наличие некоторой промежуточной — относительно универсальной — группы процессов (модуль 2). Тогда при наличии некоторого пула исходных ингредиентов, виртуально представленных соответствующим пулом цифровых профилей, и пула конечных продуктов, также представленных цифровыми профилями, сопровождаемыми цифровыми профилями состояний, конкретное воплощение технологии может быть представлено комбинаторным образом в виде некоторой комбинации модулей (Рисунок 3).

Рисунок 2

Принцип модульности технологической трансформации ингредиентов (S) в продукт ЭП (P)

Figure 2

The Principle of Modularity in the Technological Transformation of Ingredients (S) into the EN Product (P)

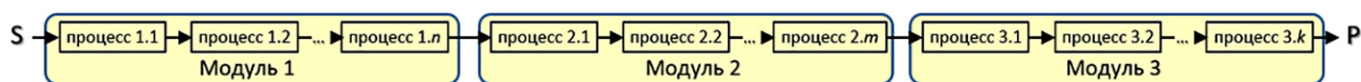
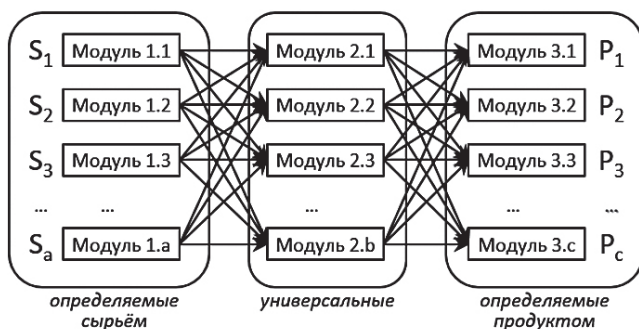


Рисунок 3

Упрощённая схема принципа комбинаторной модульности технологического процесса

Figure 3

Simplified Diagram of the Principle of Combinatorial Modularity in the Technological Process



Формирование рационального множества решений

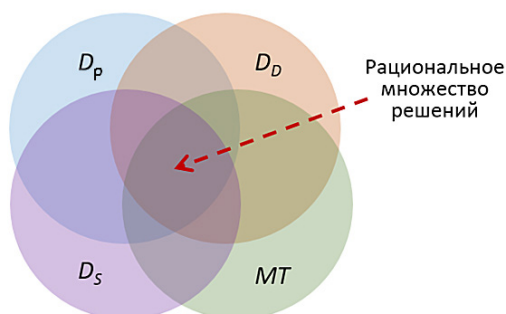
Предложенный подход позволяет реализовать комбинаторно-вариативную модульную технологию получения продукта ЭП, имеющую некоторое конечное рациональное множество вариантов реализаций. Таким образом, для конструирования продуктов ЭП вычислительный процесс должен быть организован в системе, одновременно включающей совокупность всех трёх цифровых профилей с учётом разработанного принципа модульности формирования технологии его производства. В итоге реализации подобного подхода в условиях доступного множества ингредиентов, опе-

Рисунок 4

Принцип формирования рационального множества решений

Figure 4

Principle of Forming a Rational Set of Solutions



ративного множества цифровых профилей состояния при доступном множестве комбинаций модулей и, как следствие, рациональном множестве цифровых профилей продуктов ЭП получим некоторое множество решений, являющееся пересечением указанной системы цифровых профилей (Рисунок 4). Данное множество включает весь комплекс комбинаторных механизмов, ограничительных правил, функций преобразования и т.д., а также комбинаторного рационального множества модульных технологий.

Искомое множество будет заключать в себе совокупность всех возможных решений в части конструирования продуктов ЭП с возможностью детерминации вектора решаемых задач: создания целевого ассортимента ЭП, конкретных реализаций технологических продуктов и т.д.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее проведённые исследования по проектированию пищевых систем были сфокусированы исключительно на продуктах массового спроса и продуктах перорального применения. Существующие методы конструирования пищевых систем категорически неприменимы к таким специфическим продуктам, как продукты энтерального питания, поскольку в них не учитываются многие критерии, необходимые в случае энтерального питания. При этом традиционный подход к разработке продуктов ЭП является «штучным» (индивидуальным для каждого конкретного случая), трудозатратным и практически немасштабируемым.

Целью текущего исследования являлось заполнение пробела существующих знаний посредством разработки новой концепции конструирования продуктов ЭП, основанной на усовершенствовании системы цифрового профилирования от сырья до потребителя и ко-нюгации её с базовыми положениями пищевой комбинаторики и модульностью технологии.

Выдвинутые предположения о неприменимости существующих подходов для разработки цифровых двойников были подтверждены необходимостью введения дополнительного цифрового профиля состояния и представления цифрового профиля продукта в виде матриц не самих физико-химических параметров и органолептических показателей, а соответствующих матриц их функций, что позволит учесть критерии, необходимые при разработке продуктов ЭП.

Полученные результаты указывают на то, что интеграция принципов пищевой комбинаторики и цифрового профилирования в сферу разработки продуктов ЭП возможна при усовершенствовании их путём расширения критериев с учётом каскадов преобразований компонентов пула задействованных в комбинаторике ингредиентов. Такой вывод основан на том, что при условии учёта изменений свойств ингредиентов потенциального продукта, его разработка несёт более дискретный характер, обеспечивая заданные показатели конечного продукта ЭП.

Результаты текущего исследования зафиксировали возможность реализовать комбинаторно-вариативную модульную технологию получения продукта ЭП, имеющую некоторое конечное рациональное множество вариантов реализаций. Этот вывод коррелирует с основными положениями, изложенными в работах авторитетных специалистов, где в результатах аналогичных исследований показана гибкость и вариативность методов цифрового профилирования (Семипятный, 2017; 2021; Хуршудян & Рябова, 2021; Oganesyants, 2020) и пищевой комбинаторики⁵ (Липатов, 1995; Липатов & Рогов, 1987).

Данное исследование имеет ряд сильных сторон. Например, результаты, полученные в ходе выполнения работы позволили нивелировать недостатки существующих подходов к проектированию пищевых продуктов применительно к продуктам ЭП. Также усовершенствование принципов пищевой комбинаторики путём введения дополнительных цифровых профилей обеспечит адекватность и дискретность полученных модульных технологий поставленной задаче — разработке конкретной формулы энтерального продукта, не уступающей по свойствам и качеству импортным аналогам. Разработанный принцип формирования рационального множества решений в общем виде является научным заделом, определяющим вектор дальнейших теоретических и практических исследований, направленных на восполнение недостаточности отечественных продуктов энтерального питания.

Основным ограничением исследования является то, что непосредственное воплощение разработанного концептуального подхода на данный момент отсутствует и планируется его практическое воплощение в дальнейших работах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ существующих подходов к конструированию продуктов ЭП в связи со специфичностью его использования обнаружил ряд проблем, связанных с ограничениями применимости; предложен новый концептуальный подход к конструированию продуктов ЭП на основе комплексного рационального цифрового профилирования с учётом принципов модульности технологической трансформации ингредиентов в готовый продукт.

Применение разработанного подхода позволит решить актуальные вопросы применимости принципа пищевой комбинаторики для производства продуктов ЭП. Дальнейшие исследования будут направлены на практическую реализацию предложенной концепции совокупного цифрового профилирования ингредиентов, состояния и продуктов ЭП, операционной формализации принципа модульности технологий и подходов к цифровым методам установления мультипараметрических взаимосвязей.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Евгения Юрьевна Агаркова: концептуализация; разработка методологии исследования; руководство исследованием.

Владимир Владимирович Кондратенко: создание рукописи и её редактирование; формальный анализ; работа с программным обеспечением.

Наталия Сергеевна, Пряничникова: проведение исследований; создание черновика рукописи; визуализация данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Evgeniya Yu. Agarkova: conceptualization; development of research methodology; research management.

Vladimir V. Kondratenko: creation of the manuscript and its editing; formal analysis; work with software.

Nataliya S. Pryanichnikova: conducting research; creating a draft manuscript; data visualization.

⁵ Забодалова, Л. А. (2015). Научные основы создания продуктов функционального назначения: Учебно-методическое пособие. СПб: Университет ИТМО.

ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Агаркова, Е. Ю., & Шерстнева, Н. Е. (2024). Состояние рынка продуктов для энтерального питания. *Молочная промышленность*, 2, 16–24. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-2-1>
- Agarkova, E. Y., & Sherstneva, N. E. (2024). The state of the enteral nutrition products market. *Dairy Industry*, 2, 16–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-2-1>
- Галстян, А. Г. (2009). *Развитие научных основ и практические решения совершенствования технологий, повышения качества и расширения ассортимента молочных консервов* [Диссертация доктора технических наук]. Москва.
- Galstyan, A. G. (2009). *Development of scientific foundations and practical solutions for improving technologies, quality, and assortment of dairy preserves* [Unpublished dissertation dissertation]. Moscow. (In Russ.)
- Липатов, Н. Н. (1995). Предпосылки компьютерного проектирования продуктов и рационов питания с задаваемой пищевой ценностью. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (3), 4–9.
- Lipatov, N. N. (1995). Prerequisites for computer design of products and diets with specified nutritional value. *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*, (3), 4–9. (In Russ.)
- Липатов, Н. Н., & Рогов, И. А. (1987). Методология проектирования продуктов питания с требуемым комплексом показателей пищевой ценности. *Известия вузов. Пищевая технология*, (2), 9–15.
- Lipatov, N. N., & Rogov, I. A. (1987). Methodology for designing food products with the required set of nutritional value indicators. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Pishchevaya Tekhnologiya*, (2), 9–15. (In Russ.)
- Луфт, В. М., Лапицкий, А. В., & Захарова, Е. В. (2017). *Протоколы нутриционной поддержки больных (пострадавших) в интенсивной медицине*. Санкт-Петербург: «Геликон Плюс.
- Luft, V. M., Lapitsky, A. V., & Zakharova, E. V. (2017). *Protocols for nutritional support of patients in intensive medicine*. St. Petersburg: Helikon Plus. (In Russ.)
- Обухова, О. А., Курмуков, И. А., & Рык, А. А. (2022). Влияние нутритивной поддержки на питательный статус, качество жизни и выживаемость у онкологических больных, получающих системное лекарственное противоопухолевое лечение. *Клиническое питание и метаболизм*, 3(1), 50–61. <https://doi.org/10.17816/clinutr104771>
- Obukhova, O. A., Kurmukov, I. A., & Ryk, A. A. (2022). The impact of nutritional support on nutritional status, quality of life, and survival in cancer patients receiving systemic antitumor therapy. *Clinical Nutrition and Metabolism*, 3(1), 50–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/clinutr104771>
- Семипятный, В. К. (2021). *Идентификация пищевых продуктов. Цифровые мета-информационные решения*. Москва: ВНИМИ.
- Semipyatny, V. K. (2021). *Identification of food products. Digital meta-information solutions*. Moscow: VNIMI. (In Russ.)
- Семипятный, В. К. (2018). Оптимизация экспериментального моделирования новых рецептур напитков методами математической статистики. *Пиво и напитки*, (3), 48–51.
- Semipyatny, V. K. (2018). Optimization of experimental modeling of new beverage recipes using mathematical statistics methods. *Beer and Beverages*, (3), 48–51. (In Russ.)
- Тутельян, В. А., & Никитюк, Д. Б. (Ред.). (2020). *Нутрициология и клиническая диетология: Национальное руководство*. Москва: ГЭОТАР-Медиа.
- Tutelyan, V. A., & Nikityuk, D. B. (2020). *Nutritional science and clinical dietology: National manual*. Moscow: GEOTAR-Media. (In Russ.)
- Хуршудян, С. А., & Рябова, А. Е. (2021). Качество продукции: Проблема обобщенной модели. *Контроль качества продукции*, (5), 50–53. <https://doi.org/10.35400/2541-9900-2021-5-50-53>
- Khurshudyan, S. A., & Ryabova, A. E. (2021). Product quality: The problem of a generalized model. *Product Quality Control*, (5), 50–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.35400/2541-9900-2021-5-50-53>
- Barbalho, S. M., Flato, U. A. P., Tofano, R. J., Goulart, R. de A., Guiguer, E. L., Detregiachi, C. R. P., Buchaim, D. V., Araújo, A. C., Buchaim, R. L., Reina, F. T. R., Biteli, P., Reina, D. O. B. R., & Bechara, M. D. (2020). Physical exercise and myokines: Relationships with sarcopenia and cardiovascular complications. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(10), 3607. <https://doi.org/10.3390/ijms21103607>
- Bear, D. E. et al. (2021). The role of nutritional support in the physical and functional recovery of critically ill patients: A narrative review. *Critical Care*, 21, 1–10. <https://doi.org/10.1186/s13054-017-1810-2>
- Cass, A. R. & Charlton, K. E. (2022) Prevalence of hospital-acquired malnutrition and modifiable determinants of nutritional deterioration during inpatient admissions: A systematic

- review of the evidence. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 35(6), 1043–1058. <https://doi.org/10.1111/jhn.13009>
- Correia, M. I. T. D., Perman, M. I., & Waitzberg, D. L. (2017) Hospital malnutrition in Latin America: A systematic review. *Clinical Nutrition*, 36(4), 958–967. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2016.06.025>
- Derosa, G., D'Angelo, A., & Maffioli, P. (2020) Change of some oxidative stress parameters after supplementation with whey protein isolate in patients with type 2 diabetes. *Nutrition*, 73, 110700. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2019.110700>
- Ekcici, M., Isci G., & Bicer, N. C. (2024) Enteral nutrition formulas: Analysis of phthalate esters and deterministic assessment of health risks. *Journal of Food Composition and Analysis*, 126, 105848. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105848>
- Gillis, C. & Wischmeyer, P. E. (2019). Pre-operative nutrition and the elective surgical patient: Why, how and what? *Anaesthesia*, 74, 27–35. <https://doi.org/10.1111/ANAE.14506>
- Ignowski, E. et al. (2018) The cysteine-rich whey protein supplement, Immunocal®, preserves brain glutathione and improves cognitive, motor, and histopathological indices of traumatic brain injury in a mouse model of controlled cortical impact. *Free Radical Biology and Medicine*, 124, 328–341. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.06.026>
- Inciong, J. F. B., Chaudhary, A., Hsu, H.-S., Joshi, R., Seo, J.-M., Trung, L. V., Ungpinpong, W., & Usman, N. (2020). Hospital malnutrition in northeast and southeast Asia: A systematic literature review. *Clinical Nutrition ESPEN*, 39, 30–45. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2020.06.001>
- Kashiwagi, S., Kanda, N., Yoshida, M., Yuji Wakimoto, Hiroyuki Ohbe, & Nakamura, K. (2024). Effects of early enteral nutrition on persistent inflammation, immunosuppression, and catabolism syndrome in critically ill patients: A claims database study using a propensity score analysis. *Clinical Nutrition*, 43(8), 1872–1879. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2024.06.033>
- Mohajir, W. A., O'keefe, S.J., Seres, D.S. (2022) Disease-related malnutrition and enteral nutrition. *Medical Clinics of North America*, 106(5), e1-e16, <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2022.10.002>
- Murphy, J. D., Cooke, K. R., Symons, H. J., & Brigit VanGraafeiland. (2023). Enteral nutrition optimization program for children undergoing blood & marrow transplantation: A quality improvement project. *Journal of Pediatric Nursing*, 74, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.pedn.2023.11.015>
- Oganesyants, L. A., Khurshudyan, S. A., Galstyan, A. G., Semipyatny, V. K., Ryabova, A. E., Vafin, R. R., Nurmukhanbetova, D. E., & Assembayeva, E. K. (2023) Base matrices — Invariant digital identifiers of food products. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 6(432), 6–15. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.30>
- Oganesyants, L. (2020) Multi-criteria food products identification by fuzzy logic methods. *Foods and Raw Materials*, 8(1), 12–19. <https://doi.org/10.21603/2308-40>
- Santana Porbén, S. (1974). *El esqueleto en la taquilla del hospital* [The skeleton in the hospital closet]. *Nutrition Today*, 9, 4–8.
- Talavera, M. L. (2023) Ethical duty, ethics and right to nutritional care. *Clinical Nutrition Open Science*, 48, 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.nutos.2023.01.001>
- Turan, M., Cengiz, Z., Olmaz, D. (2024) Evidence-based investigation of nurses' nutrition interventions in intensive care patients regarding enteral nutrition. *Dimensions of Critical Care Nursing*, 43(3), 123–129. <https://doi.org/10.1097/TA.00000000000004303>

Разработка технологии продуктов питания с применением смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки

О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Т.В. Кандиано

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Растущий интерес к здоровому питанию стимулирует разработку продуктов с улучшенными питательными свойствами. Цельносмолотая пшеничная мука, обогащённая пищевыми волокнами, витаминами и микроэлементами, в сочетании с кунжутной мукой, богатой растительными белками и полиненасыщенными жирными кислотами, обладает высоким потенциалом. Однако вопросы совершенствования технологий продуктов на основе таких смесей остаются недостаточно изученными и требуют дальнейших исследований.

Цель: Исследование возможности использования смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки в создании новых видов кондитерских, кулинарных и макаронных изделий, таких как творожное печенье, морковное пирожное и домашняя лапша.

Материалы и методы: В качестве объекта исследования использовали смесь цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки, а также творожного печенья, морковного пирожного и домашней лапши из композитной пшенично-кунжутной муки различного соотношения. Определение качества цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки проводили по физико-химическим и органолептическим свойствам. Для оценки органолептических качеств объектов исследований использовали стандартные методики.

Результаты: Разработаны рациональные рецептуры продукции питания в виде творожного печенья, морковного пирожного и домашней лапши из исследуемой смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки. Выявлено, что в процессе хранения творожного печенья в течение первых 10 суток кислотные числа во всех образцах остаются практически неизменными, однако на 20-е сутки в образцах наблюдается увеличение кислотных чисел. В образцах из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки продолжается увеличение продуктов гидролитического расщепления, что отражается на росте его кислотного числа. Установлено, что домашняя лапша из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки хорошо сохраняет форму и характерный кунжутный привкус. Показано, что лапша с содержанием в смеси 9 % цельносмолотой кунжутной муки может быть рекомендована для практического использования.

Выводы: Полученные результаты можно использовать в индустрии питания и пищевой промышленности для расширения ассортимента обогащенных мучных изделий из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки. Разработана рецептура творожного печенья, морковного пирожного и домашней лапши. Полученные данные способствуют развитию технологий сбережения здоровья и расширяют практическую предметную область в производстве изделий повышенной пищевой ценности.

Ключевые слова: здоровое питание; цельносмолотая пшеничная и кунжутная мука; ассортимент изделий; творожное печенье; морковное пирожное; домашняя лапша

Корреспонденция:

Олег Александрович Суворов,
E-mail: SuvorovOA@ya.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 13.03.2024

Принята: 16.12.2024

Опубликована: 27.12.2024

Copyright: © 2024 Авторы



Для цитирования: Суворов, О. А., Кандроков, Р. Х., & Кандиано, Т. В. (2024). Разработка технологии продуктов питания с применением смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки. *FOOD METAENGINEERING*, 2(4), 36–52. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.4.75>

Development of Food Technology with a Mixture of Whole-Milled Wheat and Sesame Flours

Oleg A. Suvorov, Roman Kh. Kandrov, Tatyana V. Candiano

Russian Biotechnological University,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: The growing interest in healthy eating stimulates the development of products with improved nutritional properties. Whole-grain wheat flour, enriched with dietary fiber, vitamins, and micronutrients, combined with sesame flour, rich in plant proteins and polyunsaturated fatty acids, has significant potential. However, the improvement of technologies for products based on such mixtures remains insufficiently studied and requires further research.

Purpose: To investigate the potential of using a mixture of whole-grain wheat and sesame flours in creating new types of confectionery, culinary, and pasta products, such as cottage cheese cookies, carrot cake, and homemade noodles.

Materials and Methods: The study focused on a mixture of whole-grain wheat and sesame flours and products such as cottage cheese cookies, carrot cake, and homemade noodles made from the composite wheat-sesame flour in various ratios. The quality of whole-grain wheat and sesame flours was assessed based on physicochemical and organoleptic properties. Standard methodologies were used to evaluate the sensory qualities of the test products.

Results: Rational recipes for nutritional products such as cottage cheese cookies, carrot cake, and homemade noodles made from the studied mixture of whole-grain wheat and sesame flours were developed. It was found that during the storage of cottage cheese cookies for the first 10 days, the acid numbers in all samples remained practically unchanged. However, by the 20th day, an increase in acid numbers was observed in the samples. In samples made from the mixture of whole-grain wheat and sesame flours, the hydrolytic breakdown products continued to increase, which was reflected in the rise of their acid number. It was established that homemade noodles made from the mixture of whole-grain wheat and sesame flours retained their shape and characteristic sesame flavor well. It was shown that noodles containing 9% whole-grain sesame flour in the mixture can be recommended for practical use.

Conclusion: The obtained results can be utilized in the food industry to expand the range of fortified flour-based products from a mixture of whole-grain wheat and sesame flours. Recipes for cottage cheese cookies, carrot cake, and homemade noodles have been developed. The data contribute to the development of health-preserving technologies and expand the practical scope in the production of high-nutritional-value products.

Keywords: healthy nutrition; whole wheat and sesame flour; product assortment; cottage cheese cookies; carrot cake; homemade noodles

Correspondence:

Oleg A. Suvorov,

E-mail: SuvorovOA@ya.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 13.03.2024

Accepted: 16.12.2024

Published: 27.12.2024

Funding:

The research was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FNSS-2022-0006 "Study of the functional potential of national dairy products for the formation of their identification matrices integrated into global databases."

Copyright: © 2024 The Authors



To cite: Suvorov, O. A., Kandrov, R. Kh., & Candiano, T. V. (2024). Development of food technology with a mixture of whole-milled wheat and sesame flours. *FOOD METAENGINEERING*, 2(4), 36–52. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.4.75>

ВВЕДЕНИЕ

Изделия на основе смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки представляют собой продукты с высокой пищевой ценностью, которые могут стать важной частью сбалансированного питания населения нашей страны. Цельносмолотая пшеничная мука сохраняет все части зерна, включая оболочки, алейроновый слой и зародыши, благодаря чему она обогащена пищевыми волокнами, витаминами группы В, витамином Е, а также микроэлементами, такими как железо, цинк и магний (Бакин, 2016; Коломникова, 2016; Резниченко, 2017; Кузьмина, 2019; Fasuan, 2018; Mushtaq, 2020).

Добавление кунжутной муки делает продукт источником качественных растительных белков, полиненасыщенных жирных кислот, включая омега-3 и омега-6, а также витаминов и минералов, среди которых выделяются кальций, магний и фосфор (Agidew, 2021; Elleuch, 2022). Семена кунжута содержат также лигнаны, которые обладают антиоксидантными свойствами и могут способствовать снижению уровня холестерина в крови (Shahi, 20220).

Сочетание цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки в лапше не только улучшает её вкусовые качества, но и обеспечивает более широкий спектр питательных веществ по сравнению с традиционной лапшой из очищенной пшеничной муки. Потребление макаронных, мучных кондитерских и кулинарных изделий из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки может способствовать улучшению пищеварения за счет высокого содержания пищевых волокон, поддержанию здоровья сердечно-сосудистой системы благодаря полиненасыщенным жирным кислотам и укреплению костной ткани за счет высокого содержания кальция (Fasuan, 2018; Mushtaq, 2020).

Растущее внимание к здоровому образу жизни и натуральным продуктам создает благоприятные условия для введения в ассортимент обогащенных продуктов (Коломникова, 2016). Кунжут, с другой стороны, отличается своими антиоксидантными свойствами и высоким содержанием полезных жиров и микроэлементов, таких как кальций и магний. Объединение этих двух культур для производства различных изделий может

привести к созданию продуктов питания с улучшенным питательным профилем и новыми вкусовыми характеристиками (Бань, 2019).

Несмотря на высокий интерес исследователей на смесь цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки, совершенствование технологии продуктов питания с применением смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки изучено недостаточно и требует дальнейшего исследования.

Целью представленной работы является исследование возможности использования смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки для создания новых видов различных изделий, таких как творожное печенье, морковное пирожное и лапша.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Состояние и анализ современного рынка производства мучных кондитерских изделий в России и за рубежом

В 2022 году мировой рынок мучных кондитерских изделий достиг 76,9 миллионов тонн или 516,3 миллиарда долларов США. За весь период анализа мировой рынок продолжал расти и имел положительную динамику, с годовым темпом роста в 2,6%. Структура производства мучных кондитерских изделий^{1,2} по федеральным округам за первое полугодие 2023 года представлена на Рисунке 1^{1,2}.

Приволжский ФО является лидером в производстве мучных кондитерских изделий, владея 24,2% рынка по всей России. За ним следуют Центральный ФО и Южный ФО, имеющие доли рынка в 22,8% и 13,8%, соответственно.

В 2022 году объем экспорта российской продукции на зарубежные рынки достиг 338,6 тыс. тонн, что на 15,4% больше, чем в предыдущем году. Выручка от экспорта в 2022 году составила 557,4 млн долларов США, что на 22,6% выше уровня предыдущего года. Казахстан, Беларусь и Киргизия были основными покупателями российской продукции в 2022 году, доля их покупок составила соответственно 32,1%, 19,8% и 6,9%.

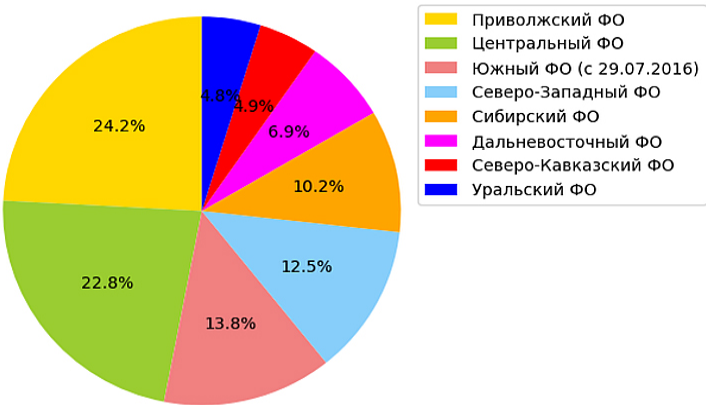
¹ Анализ рынка хлеба и хлебобулочных изделий в России в 2015–2019 гг., оценка влияния коронавируса и прогноз на 2020–2024 гг. // BusinesStat: готовые обзоры рынка. <https://businesstat.ru>

² Sfera.fm. Food market news. Ситуация на рынке кондитерских изделий России в первом полугодии 2023. <https://sfera.fm/interviews/konditer/situatsiya-na-rynke-konditerskikh-izdelii-rossii-v-pervom-polugodii-2023>

О.А. Суворов, Р.Х. Кандрок, Т.В. Кандиано

Рисунок 1
Структура производства мучных кондитерских изделий по федеральным округам по результатам января-июля 2023 года

Figure 1
Structure of Flour Confectionery Production by Federal Districts Based on Results from January to July 2023



Ассортимент мучного кондитерского изделия, кулинарного и макаронного изделия из пшенично-кунжутной муки

Глобальный рынок мучных кондитерских изделий представляет большие возможности для российских производителей, которые могут успешно конкурировать с местными игроками и удовлетворять спрос потребителей^{1,2}. Значимость обогащения продуктов питания не вызывает сомнений. При этом, одними из популярных мучных кондитерских изделий являются печенье и пирожные, которые можно обогатить дополнительными витаминами, минеральными веществами, благодаря

Таблица 1
Перечень использованного сырья

Table 1
List of Raw Materials Used

Название	Производитель	Нормативный документ	Адрес производства
Мука пшеничная цельнозерновая	ООО «Агрокомбинат Тамбов-крахмал»	СТО 12396977–022-2014	Россия, 393130, Тамбовская область, Уметский р-н, р.п. Умет, ул. Рабочая, д. 55
Кунжутная цельнозерновая мука	ИП Останина А.А.	ТУ 10.41.41–003-0149457162–2021	Россия, Удмуртская Республика, д. Сеныч, ул. Центральная д. 21
Пшеничная мука в/с	ООО «Гарнец»	ГОСТ 26574–2017	Россия, Владимирская обл., Суздальский р-н, с. Сновицы

³ ГОСТ 31645–2012. Мука для продуктов детского питания. Технические условия

использованию цельнозерновой пшенично-кунжутной муки. Использование цельнозерновой пшенично-кунжутной муки позволит также улучшить текстуру и вкус продуктов, а также повысить его пищевую ценность.

Отдельно следует обратить внимание на домашнюю лапшу, как один из популярных видов продуктов питания, которая традиционно изготавливается из пшеничной муки высоких сортов и имеет ограниченный набор питательных веществ. В свете стремления к обогащению рациона, появляется потребность в создании новых видов лапши, которые были бы не только вкусными, но и полезными (Коломникова, 2016). Опорой настоящего исследования явились труды отечественных (Магомедов, 2014; Санжаровская, 2018; Кузьмина, 2019) и зарубежных (Khaleel, 2007; Bedigian, 2010; Alzahrani, 2021; Agustin, 2022) ученых.

Таким образом, актуальным являются исследования, направленные на разработку новых, обогащенных продуктов на зерновой основе с использованием фитохимического потенциала применяемого исходного сырья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Анализировали цельнозерновую муку из пшеницы и кунжута по физико-химическим и органолептическим свойствам. Для оценки органолептических качеств муки использовали методику по ГОСТ Р 31645–2012³.

При проведении исследований использовали образцы из цельнозерновой пшеничной и кунжутной муки. В качестве контрольного образца использовали пшеничную хлебопекарную муку высшего сорта.

Перечень использованного сырья представлена в Таблице 1.

О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Т.В. Кандиано

Оборудование

Перечень использованного оборудования и приборов представлен в Таблице 2.

Методы

Изучение структурно-механических свойств исследуемых образцов

На приборе Реотест с коаксиальными цилиндрами в режиме 1а проводились измерения реологических показателей теста для печенья при 12 различных скоростях сдвига от 0,333 до 145,8 с⁻¹. При этом определяли предельное напряжение сдвига (θ) и динамическую вязкость (η) в образцах, выработанных и хранившихся при температуре производства и хранения как в прямом, так и в обратном направлении.

Динамическую вязкость при каждой величине вращения рассчитывали по формуле:

ηэф = (k × θ) / Nд, (1)

где Nд — действительная частота вращения ротора; k — константа измерительной головки:

k = (1 - (Rв/Rн)²) / (4π); (2)

k = (1 - (0,81)²) / (4 × 3,14) = 0,0274. (3)

Измеряемое значение напряжения сдвига при различных скоростях вращения ротора измерительной головки в соответствии с жесткостью торсиона определяли

θ = Z × α, (4)

где α — показатель стрелочного логометра; Z — константа ротора, равная при жесткости торсиона I — 1,69, при жесткости торсиона II — 8,45.

Опыты проводились в трехкратной повторности.

Методы анализа готовых изделий

После лабораторной выпечки, готовые продукты были подвергнуты анализу физико-химических и органолептических показателей качества. Определение органолептических показателей мучных кондитерских изделий после выпечки проводилось в соответствии с ГОСТ 5897-90⁴.

Процедура исследования

Для оценки качества готовых образцов из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки в соответствии с ГОСТ 24901 «Печенье. ОТУ» определены следующие показатели качества: внешний вид, цвет, вкус, запах, текстура, форма, поверхность и вид в изломе. Каждый критерий был оценен по пятибальной шкалой. Методом построения профилограмм собраны профили каждого критерия для дальнейшей оценки органолептических показателей продуктов.

Таблица 2

Перечень использованного оборудования и приборов

Table 2

List of Equipment and Instruments Used

Измеряемый показатель	Прибор	Марка	Производитель
Изучение структурно-механических свойств	Ротационный вискозиметр	Rheotest RN4	Россия
Определение вододерживающей способности (ВУС)	Центрифуга	Z 167 M Hermle	Германия
Определение влажности муки	Сушильный шкаф	Таглер СЭШ-3М-02	Россия
Определение кислотного и перекисного чисел	Анализатор	ИНФРАКАН-3150	Россия
Химический состав муки	ИК-анализатор	SpectraAlyzer GRAIN	Германия
Выпечка изделий	Шкаф хлебопекарный лабораторный	ШХЛ-065 СПУ	Россия

⁴ ГОСТ 5897-90. Изделия кондитерские. Методы определения органолептических показателей качества, размеров, массы нетто и составных частей. Введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1.11.2011 г. — Москва: Стандартинформ, 2013. — 12 с.

О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Т.В. Кандиано

Анализ данных

Результаты обрабатывали методами математической статистики с помощью пакета прикладных программ Statistica 6.0, KOMPAS-3D и Microsoft Office 2021. При оценке качества созданных продуктов применялись критерии, установленные ТР ТС 021/2011⁵.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнительный анализ показателей
качества цельносмолотой пшеничной
и кунжутной муки

На первом этапе исследований для обоснования возможности использования смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки в качестве обогащающего ингредиента теста проведен сравнительный анализ их показателей качества. Химический состав кунжутной муки, как обогатителя творожного печенья, морковного пирожного и домашней лапши, представлен в Таблице 3.

Внешний вид образцов исследуемой муки, объектов наших исследований, представлен на Рисунке 2.

Пшеничные зерна подвергаются процессу цельного помола, при котором измельчаются и остаются все части

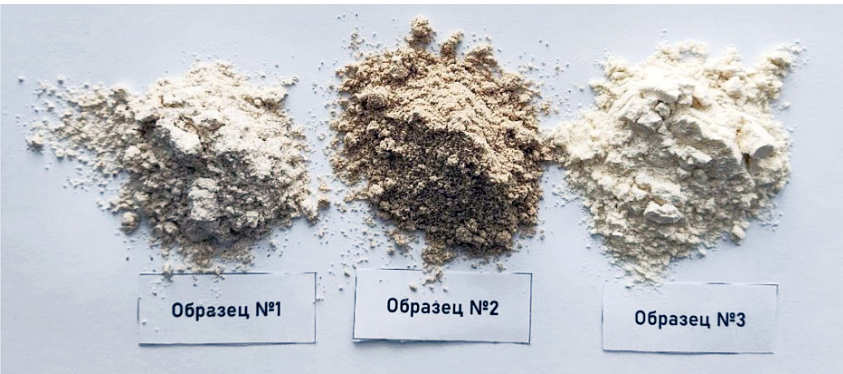
Таблица 3
Химический состав кунжутной муки

Table 3
Chemical Composition of Sesame Flour

Наименование показателя	Единица измерения	Результат испытания	Погрешность
Процентное содержание сухого вещества	%	90,56	±1,12
Процентное содержание сырого протеина	%	33,13	±0,3
Процентное содержание сырого жира	%	13,22	±1,01
Процентное содержание растворимых углеводов	%	8,27	±1,0
Процентное содержание легкогидролизуемых углеводов	%	4,7	±1,1
Процентное содержание сырой клетчатки	%	14,62	±1,6
Процентное содержание фосфора	%	0,37	±0,07
Процентное содержание азота	%	5,1	±0,2
Процентное содержание железа	мг/кг	74,8	±5,99
Процентное содержание калия	г/кг	8,79	±0,26
Процентное содержание кальция	г/кг	3,41	±0,24
Процентное содержание магния	г/кг	3,99	±0,24
Процентное содержание марганца	мг/кг	17,56	±1,05
Процентное содержание меди	мг/кг	8,89	±2,4
Процентное содержание натрия	мг/кг	170,0	±30,0
Процентное содержание цинка	мг/кг	27,99	±3,08

Рисунок 2
Образцы исследуемых видов муки

Figure 2
Samples of the Studied Types of Flour



Примечания. Образец № 1 — пшеничная мука цельносмолотая; образец № 2 — кунжутная мука цельносмолотая; образец № 3 — пшеничная мука высшего сорта
Note. Sample No. 1 — Whole-grain wheat flour; Sample No. 2 — Whole-grain sesame flour; Sample No. 3 — Premium-grade wheat flour.

⁵ Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 О безопасности пищевой продукции : утв. решением комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 880. — действ. с 01.07.2013. Москва: Стандартинформ.

О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Т.В. Кандиано

зерна, включая отруби и зародыши, что обеспечивает повышенное содержание пищевых волокон, витаминов и минералов. Кунжутные семена также тщательно очищаются и подготавливаются к дальнейшему использованию. В Таблице 4 приведены органолептические показатели муки.

Таблица 4
Органолептические показатели различных видов муки

Table 4
Organoleptic Characteristics of Different Types of Flour

Наименование образца	Показатели оценки		
	Цвет	Вкус	Запах
Мука пшеничная цельнозерновая	Белый с желтоватым оттенком с частицами оболочек зерна	Свойственный данному виду муки, без кисловатого, горьковатого и других посторонних привкусов	Свойственный нормальной муке, без запаха плесени, затхлости и других посторонних запахов
Кунжутная мука	Бежевый	Свойственный семенам кунжута, с легкой горечью	Свойственный семенам кунжута, без посторонних запахов, не затхлый, не плесневый
Пшеничная мука в/с	Белый	Сладковатый приятный вкус без горьковатого и кислого привкуса	Приятный, свежий запах, без посторонних запахов, не затхлый, не плесневелый

Технологические характеристики изучаемых образцов муки сравнивались на основе их водоудерживающей способности (ВУС). В Таблице 5 приведена водоудерживающая способность различных видов муки.

Таблица 5
Водоудерживающая способность различных видов муки

Table 5
Water-Holding Capacity of Different Types of Flour

Наименование образцов	ВУС, %
Мука пшеничная цельносмолотая	82 ± 4
Мука кунжутная	390 ± 16
Мука пшеничная в/с	72 ± 4

Согласно данным Таблице 5, водоудерживающая способность у кунжутной муки в среднем 5,4 раза выше, чем у цельносмолотой пшеничной муки и пшеничной

муки высшего сорта. Такие свойства кунжутной муки обусловлены, тем, что белки и пищевые волокна, содержащиеся в кунжутной муке, способны дополнительно связывать и удерживать воду.

Разработка творожного печенья на основе смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки

Серия образцов печенья была изготовлена с использованием цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки. Пропорции ингредиентов для каждого образца указаны в Таблице 6, а внешний вид теста и образцов после выпечки представлен на Рисунках 5 и 6.

Таблица 6
Рецептура на производство творожного печенья из смеси пшеничной и кунжутной муки

Table 6
Recipe for the Production of Cottage Cheese Cookies from a Mixture of Wheat and Sesame Flour

Наименование продуктов	Масса брутто, г					
	Об-разец № 1	Об-разец № 2	Об-разец № 3	Об-разец № 4	Об-разец № 5	Об-разец № 6
Творог 5 % жирности	35	35	35	35	35	35
Сливочное масло 72,5 %	6	6	6	6	6	6
Сахар белый	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Соль	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Улучшитель (разрыхлитель)	1	1	1	1	1	1
Мука пшеничная цельносмолотая	28	32	34	36	38	—
Мука кунжутная цельносмолотая	12	8	6	4	2	—
Мука пшеничная высшего сорта	—	—	—	—	—	40
Выход	90	90	90	90	90	90
Соотношение пшеничной цельносмолотой и кунжутной цельносмолотой муки	70:30	80:20	85:15	90:10	95:5	—

Тесто, приготовленное с применением цельносмолотой кунжутной муки, отличается плотной текстурой, что обусловлено уникальными свойствами самой муки. Мука

О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Т.В. Кандиано

из кунжутных семян содержит высокий уровень жиров и белков, однако в ней отсутствует глютен, который придает тесту эластичность и способность к растяжимости теста. Для сравнения использовался контрольный образец печенья, приготовленный из пшеничной муки высшего сорта.

Внешний вид теста, полученного по различным рецептурам, представлен на Рисунке 3.

В исследуемых образцах измерена зависимость напряжения сдвига от градиента скорости теста из исследуемой муки сразу после приготовления теста. На Рисунке 4 отображен результат проведенного опыта.

Анализ кривых течения опытных образцов теста из исследуемой муки сразу после приготовления показывает, что кривая течения Образца № 1 и 2 находятся почти на одном уровне, что говорит о высокой вязкости

Рисунок 3

Образцы теста для творожного печенья из разных видов муки

Figure 3

Samples of Dough for Cottage Cheese Cookies Made from Different Types of Flour

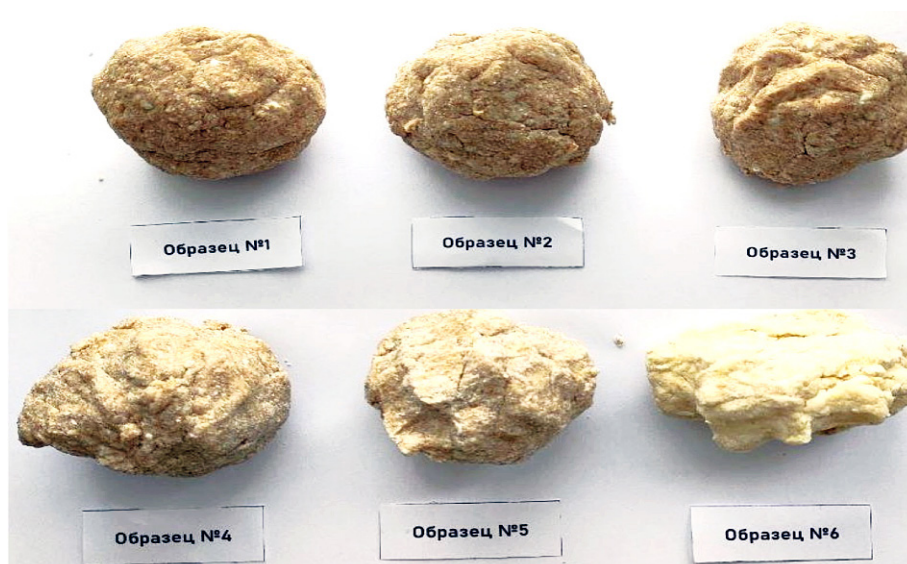
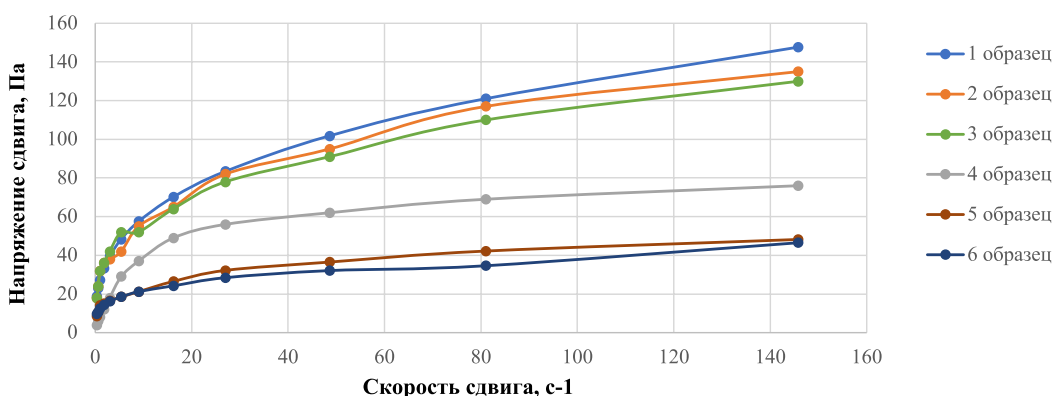


Рисунок 4

Изменение зависимости напряжения сдвига от градиента скорости теста из исследуемой муки

Figure 4

Changes in the Shear Stress Dependence on the Shear Rate Gradient of Dough Made from the Studied Flour



О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Т.В. Кандиано

образцов теста. Образец № 3 также имеет достаточно густую консистенцию. Самый низкий показатель вязкости у образца №6 — теста из пшеничной муки высшего сорта.

Тесто из кунжутной муки имеет плотную консистенцию из-за особенностей самой муки. Кунжутная мука лишена клейковины, компонента, который придает тесту эластичность и способность растягиваться.

Образцы творожного печенья из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки приведены на Рисунке 5.

Обработка полученных данных показала, что суммарные баллы образцов распределяются следующим образом (Рисунок 6).

Образцы творожного печенья № 4 и 5, в состав которых входила смесь кунжутной муки в пропорциях 5 % и 10 % от общего веса муки соответственно, были высоко оценены в ходе органолептической оценки, набрав наибольшее количество баллов. В то время как образ-

цы № 1, 2 и 3 показали менее впечатляющие результаты и не привлекли особого внимания из-за своих более низких качественных показателей. Продукция с содержанием кунжутной муки свыше 10 % не получила одобрения от экспертов из-за горьковатого послевкуся, обусловленного высоким содержанием кунжута.

Хотя образцы № 4 и 5 были оценены одинаково, для дальнейшего изучения с точки зрения пищевой и биологической ценности предпочтение стоит отдать образцу № 5, содержащему 10 % кунжутной муки. Выработанное творожное изделие на основе цельносмолотой пшенично-кунжутной муки исследовали в процессе хранения.

Согласно МУК 4.2.1847–04⁶, частота анализа выбранных образцов продукции должна быть вычислена исходя из ожидаемой продолжительности срока годности и особенностей продукта, причем количество испытаний не должно быть меньше трех для срока исследования до 30 суток (после производства, в середине сро-

Рисунок 5

Образцы творожных печений из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки

Figure 5

Samples of Cottage Cheese Cookies Made from a Mixture of Whole-Grain Wheat and Sesame Flour

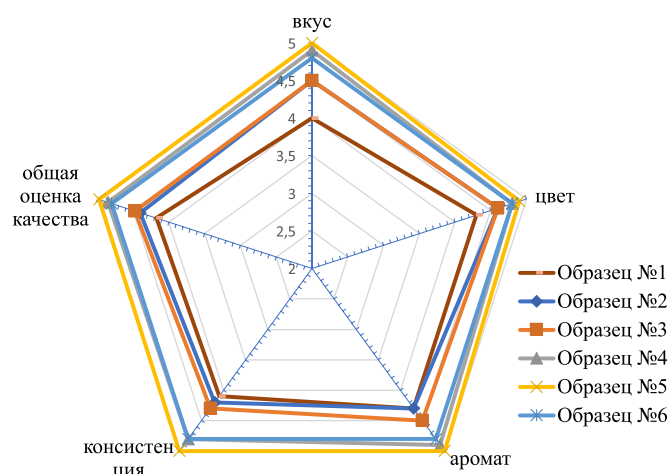


Рисунок 6

Оценка органолептических свойств образцов творожного печенья, приготовленных из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки

Figure 6

Evaluation of Organoleptic Properties of Cottage Cheese Cookie Samples Made from a Mixture of Whole-Grain Wheat and Sesame Flour



⁶ Методические указания МУК 4.2.1847–04. Санитарно-эпидемиологическая оценка обоснования сроков годности и условий хранения пищевых продуктов. Введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 20.06.2004 г. Москва: Стандартинформ.

ка годности, в предполагаемый срок годности и срок с учетом коэффициента запаса). Таким образом, для творожного печенья регулярность проверок составит 10, 20, 30 и 39 суток.

Образцы для исследования хранились при обычной комнатной температуре для оценки эффективности использования цельносмолотой кунжутной муки в составе творожного печенья. Качество продукции в большинстве случаев ухудшается из-за окисления жиров, вызванного активностью свободных радикалов (Agustin, 2022).

В исследовании были измерены кислотное и перекисное число в образце из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки в соотношении 90:10, а также в контрольном образце с пшеничной мукой высшего сорта. Измерения проводились стандартными методами каждые 10 дней на протяжении 39 суток. Результаты исследования отражены на Рисунках 7–8.

Как видно из рисунка значение кислотных чисел начинает повышаться на 20-е сутки. К 39-м суткам в контроле содержание свободных жирных кислот уменьшается, что, по мнению авторов, может быть связано с протеканием гидролитических процессов и полимеризацией липидов, аккумуляцией азотистых оснований и активностью ферментов. В экспериментальных образцах изменение кислотного числа, вероятно, может быть связано с более высоким содержанием липидов в цель-

носмолотой кунжутной муке, а также более активным гидролизом и окислением в процессе хранения.

По уровню перекисных соединений в жире можно судить о процессах окисления и порчи продукта, которые происходят значительно раньше, чем это можно заметить органолептически. В течение 39 суток после хранения образцов их значение перекисных чисел достигает максимума, после чего начинает уменьшаться. Однако образец из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки имеет более низкие значения перекисных чисел.

Так как органолептические показатели экспериментального творожного печенья в течение 39-ти суток хранения были хорошими, то в комплексе с замедлением окисления липидов эти данные указывают на возможность увеличения срока годности печенья из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки.

Разработка морковного пирожного на основе смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки

В Таблице 7 приведена разработанная рецептура морковного пирожного с 10%-ным содержанием цельносмолотой кунжутной муки.

Полученное готовое изделие в виде морковного пирожного с 10%-ным содержанием цельносмолотой кунжутной муки обогащено белками, жирами, углеводами, витаминами, минералами и другими важными

Рисунок 7

Изменения кислотного числа липидов образцов творожного печенья, выраженные в мг КОН на 1 г жира

Figure 7

Changes in the Acid Value of Lipids in Cottage Cheese Cookie Samples, Expressed in mg KOH per 1 g of Fat

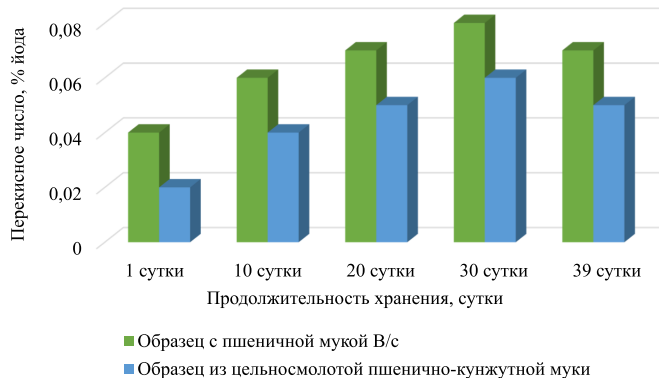


Рисунок 8

Изменение перекисного числа липидов образцов творожного печенья, % йода

Figure 8

Changes in the Peroxide Value of Lipids in Cottage Cheese Cookie Samples, % Iodine



О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Т.В. Кандиано

Таблица 7
Расчетная рецептура «Морковное пирожное на основе смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки» на 30 штук готовой продукции, масса 105 г

Table 7
Calculated Recipe for “Carrot Cake Based on a Mixture of Whole-Grain Wheat and Sesame Flour” for 30 Units of Finished Product, Weight 105 g Each

Наименование сырья и полуфабрикатов	Массовая доля сухих веществ, %	Расход сырья на 30 шт. готовой продукции, г			
		Бисквитный полуфабрикат	Сливочный крем с белым шоколадом	В натуре	В сухих веществах
Мука пшеничная ц/с	85,5	468	—	468	400,1
Мука кунжутная ц/с	98	295	—	295	289,1
Яйца куриные	27	485	—	485	131,0
Сахар белый	99,85	641	—	641	640,0
Растительное масло	99,9	390	—	390	389,6
Морковь свежая	11,7	537	—	537	62,8
Цедра апельсина	27,5	35	—	35	9,6
Разрыхлитель	93,8	26	—	26	24,4
Корица молотая	87,5	35	—	35	30,6
Мускатный орех	94,5	5	—	5	4,7
Соль пищевая	3,5	9	—	9	0,3
Сливки 33 % жирности	41	—	675	675	276,8
Белый шоколад 29,7% какао	98,7	—	300	300	296,1
Итого сырья на полуфабрикаты	—	2925	975	—	2555,2
Выход полуфабрикатов	—	2258	950	—	—
Выход полуфабрикатов в готовой продукции	—	2250	900	—	—
Итого сырья	—	—	—	3901	—
Выход готовой продукции	77,8	3150	—	—	2453,0

питательными веществами, которые способствуют поддержанию хорошего здоровья, благодаря использованию в его составе цельносмолотой кунжутной муки и моркови. Смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки отличается низким гликемическим индексом по сравнению с традиционной пшеничной мукой, что важно для поддержания стабильного уровня сахара в крови. Морковь служит превосходным источником бета-каротина, преобразующегося в организме в витамин А, жизненно необходимый для поддержания здоровой кожи, хорошего зрения и функционирования иммунной системы. Кроме того, морковь также является источником клетчатки, способствующей оптимальному пищеварению и облегчающей процесс усвоения пищи.

Внешний вид пирожного представлен на Рисунке 9.

Рисунок 9
Фотография пирожного морковного из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки

Figure 9
Photograph of Carrot Cake Made from a Mixture of Whole-Grain Wheat and Sesame Flour



О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Т.В. Кандиано

Представленное кулинарное изделие в виде морковного пирожного на основе рецепта с использованием смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки является полезным для организма за счет сбалансированного по белку и полиненасыщенным жирным кислотам химического состава семян кунжута.

Разработка лапши на основе смеси
цельносмолотой пшеничной
и кунжутной муки

Тесто для изготовления лапши приготовлено в соответствии с рецептурой и методикой, описанной в специализированной литературе (Санжаровская, 2018). Созданы 4 образца, используя смесь цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки лабораторного помола в пропорциях, указанных в Таблице 8. Для сравнения качества использовался контрольный образец, изготовленный из пшеничной хлебопекарной муки высшего сорта.

Таблица 8
Рецептура на производство лапши из смеси
цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки

Table 8
Recipe for the Production of Noodles from a Mixture of
Whole-Grain Wheat and Sesame Flour

Наименование продуктов	Масса брутто, г			
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
Мука пшеничная цельносмолотая	—	85	82	79
Мука кунжутная цельносмолотая	—	9	12	15
Мука пшеничная высшего сорта	94	—	—	—
Яйцо куриное С1	20	20	20	20
Вода питьевая	18	18	18	18
Соль пищевая	2	2	2	2
Выход	100	100	100	100

Рисунок 10
Образцы лапши из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки
Figure 10
Samples of Noodles Made from a Mixture of Whole-Grain Wheat and Sesame Flour



О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Т.В. Кандиано

В составе второго образца производилось введение кунжутной муки в количестве 10% взамен части цельносмолотой пшеничной муки, третий образец включал 13% кунжутной муки, в то время как в четвертом её содержание достигало 16%.

Замешивание теста проводилось вручную, продолжительностью от 3 до 5 минут, до достижения равномерной консистенции. Для раскатки тестовых заготовок использовалась механическая тестораскаточная машина. Образцы представлены на Рисунке 10.

Далее лапшу варили в течение трех минут до достижения необходимой степени готовности. Внешний вид готовых образцов лапши можно увидеть на Рисунке 11.

Оценка качества макаронных изделий из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки проводи-

лась после процесса варки. Продукция, созданная в соответствии с новыми рецептурами, была оценена по пятибалльной шкале для идентификации возможных недочетов и выполнения первичного анализа качества в лабораторных условиях.

Органолептические свойства экспериментальных образцов, включая тестовые изделия и лапшу, изготовленные из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки, после процесса варки представлены в Таблице 9 и на Рисунке 12.

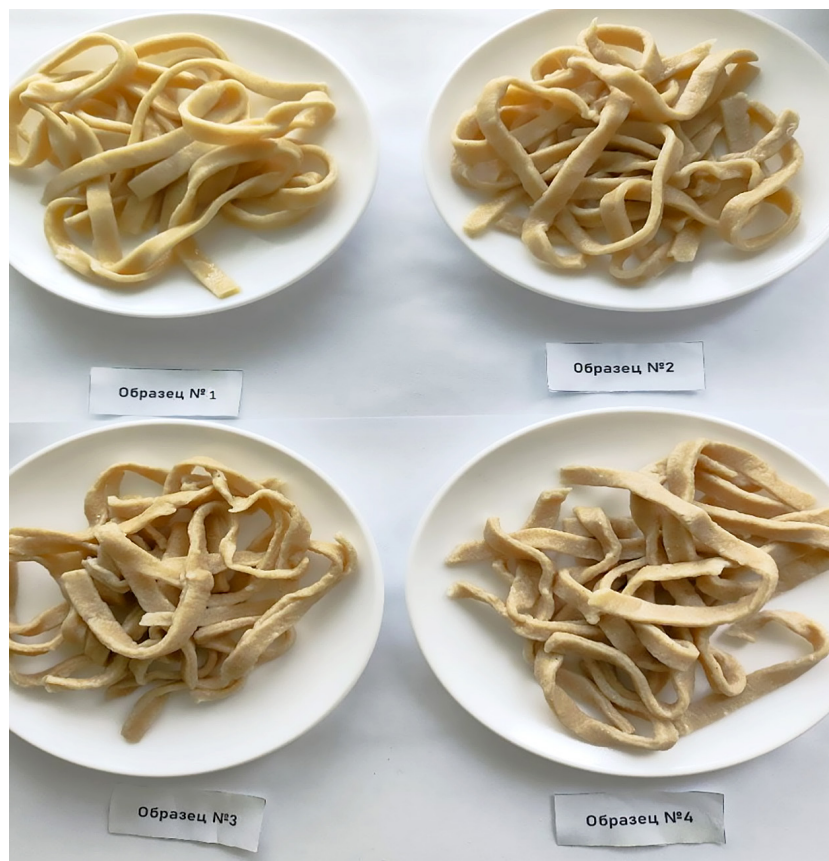
Согласно полученным данным, наилучшими характеристиками обладал второй образец домашней лапши, который отличался эластичностью и растяжимостью теста (по своим качествам напоминало традиционное пшеничное). Готовые изделия хорошо сохраняли фор-

Рисунок 11

Образцы лапши из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки после варки

Figure 11

Samples of Noodles Made from a Mixture of Whole-Grain Wheat and Sesame Flour After Cooking



О.А. Суворов, Р.Х. Кандроков, Т.В. Кандиано

Таблица 9
Органолептические возможно показатели экспериментальных образцов домашней лапши

Table 9
Organoleptic Characteristics of Experimental Homemade Noodle Samples

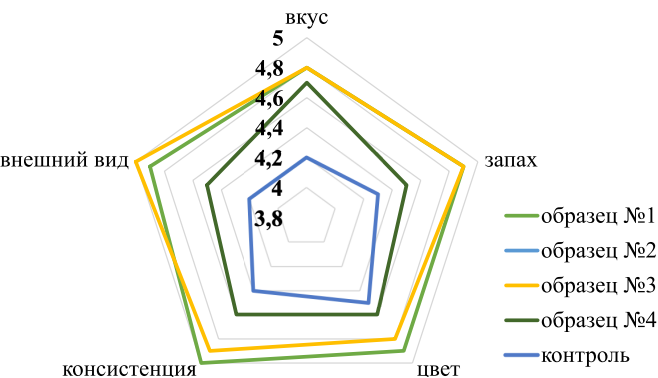
Образец	Балльная оценка	Характеристика тестовых заготовок	Характеристика готового изделия (лапши)
Образец № 1 (контроль)	4,8	Тесто получается чрезвычайно плотным и эластичным	Продукт имеет привычный вкус и сохраняет свою форму
Образец № 2	4,9	Тесто упругое, эластичное, хорошо тянется и легко формируется в шар	Лапша по форме и цвету похожа на изделия из пшеничной муки, приятные на вкус
Образец № 3	4,6	Схоже с образцом № 2, обладает высокой растяжимостью и упругостью	Лапша по форме и цвету, похожа на изделия из пшеничной муки, имеет легкий запах и нотку кунжута
Образец № 4	4,5	Тесто на ощупь оказывается особенно плотным и имеет более темный цвет по сравнению с другими образцами	Лапша плотная, но при этом эластичная. Однако, вкус может не всем понравиться из-за интенсивного привкуса кунжута

му, а привкус кунжута в них был легким и приятным. В то же время, образцы № 3 и № 4 не получили высокой оценки из-за их менее эластичного и не такого упругого теста после раскатки, а также из-за более выраженного вкуса кунжута, который сделал их вкус менее привлекательным.

Следовательно, образец № 2 с 9 % содержанием цельносмолотой кунжутной муки в рецептуре домашней лапши был признан оптимальным вариантом.

Рисунок 12
Органолептическая оценка образцов домашней лапши из смеси пшеничной и кунжутной муки после варки

Figure 12
Organoleptic Evaluation of Homemade Noodle Samples Made from a Mixture of Wheat and Sesame Flour After Cooking



ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ключевым результатом исследования являются разработанные рациональные рецептуры продукции питания из исследуемой смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки. При этом, в образцах из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки происходит увеличение содержания продуктов гидролитического расщепления, что отражается на росте его кислотного числа. Таким образом, подтвердилась гипотеза, поставленная в начале исследования, учитывая теоретическую базу, методологию работы и корреляцию полученных данных с результатами предыдущих исследований. Цель работы достигнута, полученные результаты оправдали ожидания. Настоящее исследование вносит свой вклад в существующую научную литературу в части взаимосвязи сроков хранения и изменений значений кислотного числа, формы и органолептических показателей качества готовых изделий, рекомендаций для практического использования.

Кроме того, установлено, что домашняя лапша из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки хорошо сохраняет форму, а кунжутный вкус в них был легким и приятным. В то же время, образцы № 3 и № 4 с содержанием 12 % и 15 % цельносмолотой кунжутной муки, соответственно, не получили высокой оценки из-за их менее эластичного и не такого упругого теста после раскатки, а также из-за более выраженного вкуса кунжута, который сделал эти образцы менее привлека-

тельным. Определено, что образец домашней лапши № 2 с содержанием 9% цельносмолотой кунжутной муки является рекомендуемым вариантом.

Настоящее и выполненные ранее (главным образом за последние 10 лет) исследования различными научными группами отечественных (Турсунбаева, 2019; Шахрай, 2021) и зарубежных (Morris, 2021; Elleuch, 2022) ученых, в том числе в области изучения технологических аспектов использования нетрадиционного сырья (Бакин, 2016; Коломникова, 2016; Бань, 2019) и ингредиентов функциональной направленности (Резниченко, 2017; Brigante, 2019; Agidew, 2021), в производстве продуктов питания подтверждают возможность его использования в рецептурах как мучных кондитерских изделий, так и продукции общественного питания в целом. Ранее выполненные работы были ориентированы на иной ассортимент продуктов для здорового питания. В качестве конкурентных преимуществ разработанного ассортимента продуктов питания можно выделить следующие аспекты:

- (1) обогащенные продукты: благодаря использованию смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки, изделия обладают более высоким содержанием пищевых волокон, белков, полезных полиненасыщенных жирных кислот, витаминов, макро- и микроэлементов, что делает их более привлекательными для сознательных потребителей, следящих за своим здоровьем;
- (2) уникальность вкуса изделий из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки: новизна вкусовых качеств может привлечь внимание потребителей, ищущих разнообразие в своем рационе;
- (3) маркетинговые и экономические возможности: продукты могут быть позиционированы как премиальные, что позволит установить более высокую цену и увеличить маржинальность.

Ограничения исследования

Ограничения настоящего исследования связаны с ограниченностью вариаций ингредиентов в зависимости от их физико-химических свойств, влияющих на качество и пищевую ценность готовых продуктов питания из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были разработаны рецептуры обогащенных мучных изделий из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки: творожного печенья, морковного пирожного и домашней лапши.

Полученные результаты показывают, что разработанные продукты на основе смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки обладают значительным потенциалом в сегменте продуктов здорового питания. Важным является то, что в образцах продуктов питания из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки продолжается увеличение продуктов гидролитического расщепления, что отражается на росте его кислотного числа. В процессе хранения творожного печенья из смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки в течение первых 10 суток кислотные числа во всех образцах остаются практически неизменными, однако на 20-й сутки в образцах наблюдается увеличение кислотных чисел.

Для более глубокого понимания научно-практических основ технологии продуктов питания с использованием нетрадиционного сырья необходимы дальнейшие исследования, направленные на проведение фундаментальных и прикладных исследований (медико-биологические, биотехнологические и др.) кондитерских, кулинарных и макаронных изделий с применением смеси цельносмолотой пшеничной и кунжутной муки.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Олег Александрович Суворов: концептуализация; разработка методологии исследования; общее руководство.

Роман Хажсетович Кандроков: формулирование исследовательских задач; создание модели исследования; проведение исследования; верификация данных; создание финального варианта рукописи.

Татьяна Владимировна Кандиано: анализ научно-технической литературы; проведение экспериментальных исследований; работа с программным обеспечением; создание черновика рукописи.

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Oleg A. Suvorov: conceptualization; development of the research methodology; general management.

Roman Kh. Kandrov: formulation of research tasks; creation of the research model; conducting the research; data verification; creation of the final version of the manuscript.

Tatyana V. Kandiano: analysis of scientific and technical literature; conducting experimental studies; working with software; creating a draft of the manuscript.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCE

- Бакин, И. А., Мустафина, А. С., & Колбина, А. Ю. (2016). Изучение технологических аспектов использования нетрадиционного сырья в производстве булочных изделий. *Вестник КрасГАУ*, 12, 128–134.
- Bakin, I.A., Mustafina, A.S., Kolbina, A.Yu. (2016). The research of technological aspects of untraditional raw materials using in bakery products. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*, 12, 128–134. (In Russ.).
- Бань, М. Ф. (2019). Обзор нетрадиционных видов муки и исследование возможности их использования в рецептурах мучных кондитерских изделий. *Потребительская кооперация*, 3(66), 78–81.
- Ban, M. (2019) The overview of non-traditional types of flour and the study of their use in the recipes of flour confectionary, *Consumer cooperation*, 3(66), 78–81. (In Russ.).
- Коломникова, Я. П., Литвинова, Е. В., Анохина, С. И., & Текутьева, Ю. А. (2016). Использование нетрадиционного сырья при производстве безглютеновых мучных и кулинарных изделий с целью повышения пищевой ценности. *Актуальная биотехнология*, 1(16), 45–48.
- Kolomnikova, Ya.P., Litvinova, E.V., Anokhina S.I., Tekut'eva Yu.A. Use of non-traditional raw material in the production of gluten-free floury culinary products in order to improve the nutritional value. *Actual biotechnology*, 1(16), 45–48. (In Russ.).
- Кузьмина, С. С. (2019). Использование кунжутной муки в технологии булочных изделий. *Ползуновский вестник*, (4), 12–16.
- Kuzmina, S.S. (2019). The use of sesame flour in the technology of bakery products. *Polzunovsky vestnik*, (4), 12–16. (In Russ.).
- Магомедов, Г. О., Шевякова, Т. А., & Чернышева, Ю. А. (2014). Сбивные мучные кондитерские изделия на основе муки из цельносомолотого зерна. *Вестник ВГУИТ*, 1(59), 123–129.
- Magomedov, G.O. (2014), Shevyakova, T.A., Tchernysheva, Y.A., Mazina, E.A. Whipped flour confectionery based upon whole grain ground flour. *Bulletin of Voronezh state university of engineering technologies*, 1(59), 123–129. (In Russ.).
- Резниченко, И. Ю., Рензяева, Т. В. & Табаторович, А. Н. (2017). Формирование ассортимента мучных кондитерских изделий функциональной направленности. *Техника и технология пищевых производств*, 2(45), 149–162.
- Reznichenko, I.Yu., Renzyaeva, T.V., Tabatorovich, A.N., Surkov, I.V., Chistyakov, A.M. (2017). Formation of a range of functional flour confectionery products. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2(45), 149–162. (In Russ.).
- Санжаровская, Н. С., Сокол, Н. В. & Храпко, О. П. (2018). Использование нетрадиционного сырья в технологии сырцовых пряников. *Вестник КрасГАУ*, 1(136), 147–154.
- Sanzharovskaya, N.S., Sokol, N.V., Khrapko, O.P. The use of non-traditional raw materials in raw gingerbread technology, *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*, 1(136), 147–154. (In Russ.).
- Турсунбаева, Ш. А., Изтаев, А. И., Магомедов, М. Г. & Якияева М. А. (2019). Разработка инновационных технологии хлебных изделий из цельносомолотой муки разных классов. *Вестник ВГУИТ*, 4(82), 83–88. <http://dx.doi.org/10.20914/2310-1202-2019-4-83-88>
- Tursynbaeva, S.A., Iztayev, A.I., Magomedov, M.G., Yakiyayeva, M.A. (2019). Development of innovative technologies for whole-wheat flour products of different classes. *Bulletin of*

- Voronezh State University of Engineering Technologies, 4(82), 83–88. <http://dx.doi.org/10.20914/2310-1202-2019-4-83-88> (In Russ.)
- Шахрай, Т. А., Воробьева, О. В. & Викторова, Е. П. (2021). Основные тенденции развития рынка функциональных хлебобулочных изделий. *Новые технологии*, 17(3), 51–58. <http://dx.doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-3-51-58>.
- Shakhrai, T.A., Vorobyova, O.V., Victorova, E.P. (2021). Main trends of functional bakery products market development. *New Technologies*, 17(3), 51–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-3-51-58>
- Agidew, M. G., Dubale A. A., Atlabachew, M., & Abebe, W. (2021). Fatty acid composition, total phenolic contents and antioxidant activity of white and black sesame seed varieties from different localities of Ethiopia. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 14, 107–108. <http://dx.doi.org/10.1186/s40538-021-00215-w>
- Agustin, L., & Federico, I. (2022). Novel cookie formulation with defatted sesame flour: Evaluation of its technological and sensory properties. Changes in phenolic profile, antioxidant activity, and gut microbiota after simulated gastrointestinal digestion. *Food Chemistry*, 389, 122–128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133122>
- Alzahrani, A. S. S., Price, M., Greenfield, S., & Paudyal, V. (2021). Global prevalence and types of complementary and alternative medicines use amongst adults with diabetes: systematic review and meta-analysis. *European Journal of Clinical Pharmacology*, 77(9), 1259–1274. <https://doi.org/10.1007/s00228-021-03097-x>
- Bedigian, D., Sibte-Abbas, M., Butt, M. S., Khan, M. R., & Shahid, M. (2010). Characterization of Sesame (*Sesamum indicum* L.) Germplasm: A Critique. *Food Chemistry*, 57(5), 641–647. <https://doi.org/10.1007/s10722-010-9552-x>
- Brigante, F. (2019). Targeted metabolomics to assess the authenticity of bakery products containing chia, sesame and flax seeds. *Food Chemistry*, 312(2), 1221–1231. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126059>
- Elleuch, M., Besbes, S., Roiseux, O., Blecker, C., & Attia, H. (2022). Quality characteristics of sesame seeds and by-products. *Food Chemistry*, 103(2), 641–650. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.09.008>
- Fasuan, T. O., Gbadamosi, S. O., & Omobuwajo, T. O. (2018). Characterization of protein isolate from sesamum indicum seed: In vitro protein digestibility, amino acid profile, and some functional properties. *Food Science & Nutrition*, 6, 1715–1723. <https://doi.org/10.1002/fsn.3743>
- Khaleel, E. S., Gonaïd, M. H., El-Bagry, R. I., Sleem, A. A., & Shabana, M. (2007). Chemical and biological study of the residual aerial parts of *sesamum indicum* L. *Journal of Food and Drug Analysis*, 15(4), 268–275. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2416>
- Morris, J. B., Wang, M. L., & Tonniss, B. D. (2021). Variability for oil, protein, lignan, tocopherol, and fatty acid concentrations in eight sesame (*Sesamum indicum* L.) Genotypes. *Industrial Crops and Products*, 164, 113355. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113355>
- Mushtaq, A., Hanif, M. A., Ayub, M. A., Bhatti, I. A. & Jilani, M. I. (2020). Sesame. In *Medicinal Plants of South Asia* (pp. 601–615). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102659-5.00044-6>
- Shahi, M., Zakerkish, M., Zarei, M., & Saki, A. (2022). Effect of sesame supplementation on glycemic status, inflammatory markers, and adiponectin levels in patients with type 2 diabetes mellitus. *Journal of Dietary Supplements*, 14(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/19390211.2016.1204404>

Микроорганизмы для повышения уровня глутатиона: обзор предметного поля

Л.Г. Креккер, Г.А. Донская, Е.В. Колосова, В.К. Карапетян

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

Корреспонденция:

Людмила Геннадьевна Креккер,
E-mail: krekker@mail.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 21.05.2024

Принята: 16.12.2024

Опубликована: 27.12.2024

Финансирование

Работа была профинансирована Министерством образования и науки РФ в рамках реализации темы: Совершенствование методологических основ контроля качества процессов и продуктов технологий переработки молока с учетом глобальных изменений, концептуально трансформирующих традиционные основы питания, шифр FNSS-2022-0004.

Copyright: © 2024 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение: Глутатион - один из антиоксидантов пептидной природы, потребности в котором в организме увеличиваются во время стресса. Недостаток глутатиона позднее негативно отражается на антиоксидантной защите организма. Существует недостаточно изученный алиментарный метод восполнения дефицита глутатиона с помощью ферментированной пищи. Выявление точного механизма и условий синтеза глутатиона микроорганизмами, а также оценка эффективности использования ферментированной пищи для повышения уровня глутатиона, позволит понять и управлять процессом накопления глутатиона и осуществлять более эффективный ответ живых систем на стресс-факторы.

Цель: Определить границы предметного поля в области оптимальных параметров синтеза глутатиона микроорганизмами, активно продуцирующих глутатион штаммов, применения их в пищевой промышленности, медицине и животноводстве.

Материалы и методы: Обзор предметного поля опирается на протокол PRISMA-ScR. В поиске учитывались статьи, опубликованные за период с 1993 года по 2023 год в базах данных Scopus и РИНЦ. Из 3482 релевантных с точки зрения ключевых слов публикаций, 49 соответствовали критериям отбора.

Результаты: В проанализированных публикациях обнаружены основные тенденции, оказывающие значительное влияние на образование глутатиона: вид микроорганизмов, условия культивирования, наличие стресс-факторов и методы оценки эффективности антиоксидантного воздействия на живые системы. Извлеченные данные частично согласуются с предыдущими обзорами, по механизму синтеза глутатиона, но дополнены прикладными аспектами в области видового разнообразия микроорганизмов, противовирусного применения, использования в пищевой промышленности, животноводстве и растениеводстве. Обнаружены ограничения в области стандартизации понятий «антиоксидантная активность» и отсутствие регламентированных критериев ее оценки.

Выводы: Полученные данные являются ресурсом для разработки воспроизводимой стратегии увеличения глутатиона с помощью микроорганизмов и регенерации антиоксидантного потенциала живой системы посредством включения в рацион ферментированной ими пищи. Особое внимание следует уделить вопросам возможности сохранения естественных симбиозов микроорганизмов в присутствии глутатиона, обнаружению в клубеньковых микроорганизмах растений гомолога глутатиона, необходимости расширения методической и инструментальной базы оценки антиоксидантной активности, так как информации в современной научной литературе по этим вопросам недостаточно.

Ключевые слова: синтез глутатиона молочнокислыми микроорганизмами; глутатион и развитие лактобактерий; глутатион в развитии дрожжей; глутатион в пищевых микроорганизмах; ферментированные продукты, ферментированные корма для животных; использование глутатион синтезирующих микроорганизмов в медицине



Для цитирования: Креккер, Л. Г., Колосова, Е. В., Донская, Г. А., & Карапетян, В. К. (2024). Микроорганизмы для повышения уровня глутатиона: Обзор предметного поля. *FOOD METAENGINEERING*, 2(4), 53–71. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.4.61>

Microorganisms for Enhancing Glutathione Levels: A Scoping Review

Lyudmila G. Krekker, Galina A. Donskaya, Elena V. Kolosova, Varazdat K. Karapetyan

All-Russian Research Institute
of Dairy Industry, Moscow, Russian
Federation

Correspondence:

Lyudmila G. Krekker,
E-mail: krekker@mail.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of
a conflict of interest.

Received: 21.05.2024

Accepted: 16.12.2024

Published: 27.12.2024

Funding:

The work was funded by the
Ministry of Education and Science
of the Russian Federation as part of
the research topic: Improvement
of methodological foundations
for quality control of processes
and products in milk processing
technologies, taking into account
global changes that conceptually
transform traditional nutritional
principles, code FNSS-2022-0004.

Copyright: © 2024 The Authors

ABSTRACT

Introduction: Glutathione is a peptide-based antioxidant whose demand in the body increases during stress. A deficiency in glutathione can later negatively impact the body's antioxidant defense system. An insufficiently explored dietary approach to replenishing glutathione levels involves the use of fermented foods. Identifying the precise mechanisms and conditions of glutathione synthesis by microorganisms, as well as assessing the efficacy of fermented foods for increasing glutathione levels, will enable better understanding and management of glutathione accumulation processes, enhancing the organism's response to stress factors.

Purpose: To delineate the boundaries of the subject area related to optimal parameters for glutathione synthesis by microorganisms, strains actively producing glutathione, and their applications in food production, medicine, and animal husbandry.

Materials and Methods: The review is based on the PRISMA-ScR protocol. The search considered articles published between 1993 and 2023 in the Scopus and RSCI databases. Out of 3482 publications deemed relevant based on keywords, 49 met the inclusion criteria.

Results: The analyzed publications revealed key trends influencing glutathione production: microorganism species, cultivation conditions, presence of stress factors, and methods for assessing antioxidant effects on living systems. Extracted data partially align with previous reviews regarding the mechanisms of glutathione synthesis but are enriched with applied aspects, including species diversity of microorganisms, antiviral applications, use in food production, animal husbandry, and agriculture. Identified limitations include a lack of standardization in the concept of "antioxidant activity" and the absence of regulated criteria for its evaluation.

Conclusion: The obtained data serve as a resource for developing reproducible strategies to increase glutathione levels using microorganisms and to regenerate the antioxidant potential of living systems by incorporating fermented foods into the diet. Particular attention should be paid to preserving natural symbioses of microorganisms in the presence of glutathione, identifying glutathione homologs in plant rhizobia, and expanding the methodological and instrumental base for assessing antioxidant activity, as current scientific literature provides insufficient information on these issues.

Keywords: glutathione synthesis by lactic acid bacteria, glutathione and lactobacillus development, glutathione in yeast development, glutathione in food microorganisms, fermented products, fermented animal feed, use of glutathione-synthesizing microorganisms in medicine



To cite: Krekker, L. G., Kolosova, E. V., Donskaya, G. A., & Karapetyan, V. K. (2024). Microorganisms for enhancing glutathione levels: A scoping review. *FOOD METAENGINEERING*, 2(4), 53–71. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.4.61>

ВВЕДЕНИЕ

Уровень стресса у живых организмов демонстрирует стремительный рост, что, в свою очередь, способствует увеличению количества прикладных исследований, направленных на изучение его причин и разработку методов борьбы с ним. Пандемия COVID-19 актуализировала значение антиоксидантов в противодействии развивающемуся оксидативному стрессу, который характеризуется образованием большого количества свободных радикалов, наносящих ущерб различным органам и системам организма. Это объясняет растущий интерес зарубежных исследователей к изучению критериев и механизмов воздействия на уровень одного из наиболее мощных антиоксидантов — глутатиона, в биологических системах (Grażyna et al., 2017; Câmara et al., 2020; De Benedetto et al., 2014; Aguilar-Toalá et al., 2019; Ge et al., 2021). Несмотря на то, что в России этот аспект исследуется в меньшей степени, он также привлекает внимание ученых (Смирнов & Суховская, 2014; Varlamova et al., 2017).

Публикации, изданные в период с 2019 по 2023 годы и посвященные лечению и профилактике COVID-19, продемонстрировали, что при воздействии токсинов или респираторных вирусов на альвеолярные клетки происходит снижение концентрации глутатиона. Это приводит к повышению инфективности и патогенности вирусов, что можно нивелировать за счет поддержания окислительно-восстановительных и метаболических функций с помощью глутатиона (Dubina et al., 2021; Horowitz et al., 2020; Lei et al., 2020). Увеличение уровня глутатиона в организме оказывает значительное влияние на формирование антиоксидантного ответа в условиях воздействия биологических угроз. Если ранее большая часть исследований была сосредоточена на решении экспериментальных задач, связанных с изучением состава и свойств глутатиона, то в настоящее время основной акцент делается на прикладное использование продуктов, ферментированных микроорганизмами, синтезирующими глутатион, и на изучение их потенциала для повышения уровня глутатиона в организме.

Научное сообщество демонстрирует противоречивую оценку влияния глутатиона на живые системы. В ряде исследований удалось подтвердить положительное влияние глутатиона на уровень антиоксидантной активности в крови при потреблении ферментированных

продуктов и кормов (Chen et al., 2015; Pusztahelyi et al., 2015; Taté et al., 2012; Martorana et al., 2017), в то время как другие работы не продемонстрировали значимого эффекта (Meng et al., 2022; Câmara et al., 2020; De Benedetto et al., 2014; Zhao et al., 2019; Aguilar-Toalá et al., 2019; Suo et al., 2021). Это указывает на наличие научной неопределенности относительно механизмов действия глутатиона и факторов, влияющих на его накопление в клетках.

Целью данного исследования является систематизация научных данных о влиянии глутатиона на антиоксидантный ответ живых организмов и разработка подходов к повышению его уровня с использованием ферментированных продуктов, синтезируемых микроорганизмами.

Исследовательские вопросы:

- RQ#1: Какие методы применяются для повышения уровня глутатиона в живых системах и какова их эффективность?
- RQ#2: Какие механизмы накопления глутатиона в клетках организма были выявлены в ходе предыдущих исследований?
- RQ#3: Какие факторы оказывают наибольшее влияние на уровень глутатиона при использовании ферментированных продуктов?
- RQ#4: Какие расхождения в данных о воздействии глутатиона на антиоксидантный ответ были обнаружены в различных исследованиях?
- RQ#5: Каковы перспективные направления дальнейших исследований по применению глутатиона в борьбе с оксидативным стрессом и биологическими угрозами?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Стратегия исследования

Для проведения данного обзора были использованы принципы предпочтительных элементов отчетности для систематических обзоров и метаанализа PRISMA-ScR (Sarkis-Onofre et al., 2021; Тихонова & Шленская, 2021), что позволило выявить ключевые концепции, связанные с синтезом глутатиона микроорганизмами на основе отобранных источников доказательств. Поиск информации проводился в базах данных Scopus и РИНЦ за период с 1993 по 2023 год.

Л.Г. Креккер, Г.А. Донская, Е.В. Колосова, В.К. Каранетян

Критерии включения и исключения источников

Критерии отбора и исключения источников представлены в Таблице 1 и Приложении А¹.

Поиск источников

Поиск в SCOPUS был выполнен с использованием строки запроса TITLE-ABS-KEY (*glutathion*), TITLE-ABS-KEY (*glutathione microorganisms*), далее TITLE-ABS-KEY

(*glutathione lactis microorganisms*) и отдельно TITLE-ABS-KEY (*glutathione microorganisms yeast*), а из найденных были исключены варианты в которых отсутствуют TITLE-ABS-KEY (*synthesis development*), далее из найденных были исключены публикации ранее 1993 года и добавлены публикации из базы РИНЦ TITLE-ABS-KEY (*глутатион микроорганизмов*).

После удаления дублей, отобранные источники сканировались на уровне заглавий и аннотаций. Все выявленные нерелевантные источники были удалены. Далее реализовывалось полнотекстовое сканирование.

Таблица 1
Критерии отбора источников базы данных

Table 1
Criteria for Selecting Database Sources

Критерии	Включены в исследования	Исключены из исследования	Обоснование
География	Китай, Япония, США, Индия, Польша, Германия, Франция, Греция, Венгрия, Италия, Чехия, Нидерланды, Испания, Швеция, ОАЭ, Бангладеш, Ирландия, Россия	Нет	В поиске не было исключений, так как по заявленным параметрам результатом являлись статьи, в которых исследовались значимые факторы влияния на уровень глутатиона в микроорганизмах, пищевых субстратах и сыворотке крови
Концепция	Выявить новые факторы влияния и механизмы синтеза глутатиона микроорганизмами, уровень глутатиона в продуктах, клетках животных, растениях, крови животных и человека при употреблении ферментированных продуктов или кормов	Среди пищевых продуктов и кормов анализировали только те, которые содержат микроорганизмы	Значительная роль глутатиона крови в формировании антиоксидантного статуса человека и животных. Возможность увеличения антиоксидантного и иммунного ответа при употреблении продуктов и кормов, ферментированных молочнокислыми микроорганизмами и дрожжами
Контекст	Объектами исследования служат глутатион синтезирующие м/о, применяемые при производстве пищевых продуктов, кормов и биологически активных препаратов	Исследования, не имеющие отношения к пищевой промышленности, медицине, животноводству	Выявить новые физические и химические факторы влияния на уровень внутриклеточного глутатиона микроорганизмов, изменение содержания глутатиона в клетках микроорганизмов, растений и животных, крови человека при употреблении ферментированных продуктов или кормов
Язык	Английский Русский	Не английский Не русский	Необходимость в информировании русскоязычной научной аудитории о данной проблеме, большая часть из которых владеет русским и английским языками и использует scoring review-метод обзорного исследования литературы по ScR-методологии
Период времени	с 1993 по 2023	Ранее 1993	За этот период можно определить наиболее актуальные данные, оказывающие значительное влияние на синтез глутатиона и его использование как средство для повышения антиоксидантного статуса человека и животных
Типы статей	Обзорные, исследовательские	Тезисы докладов конференции, источники, не прошедшие рецензирование	—
Статус статьи	Опубликованные	Не опубликованные	Также рассматривалось цитирование статьи, с целью выявления наиболее востребованных аспектов влияния на уровень глутатиона

¹ Приложение А доступно по ссылке: <https://disk.yandex.ru/i/PaqPMFFXnm1Ofg>

И вновь выявленные нерелевантные источники, были удалены. Диаграмма отбора источников представлена на Рисунке 1.

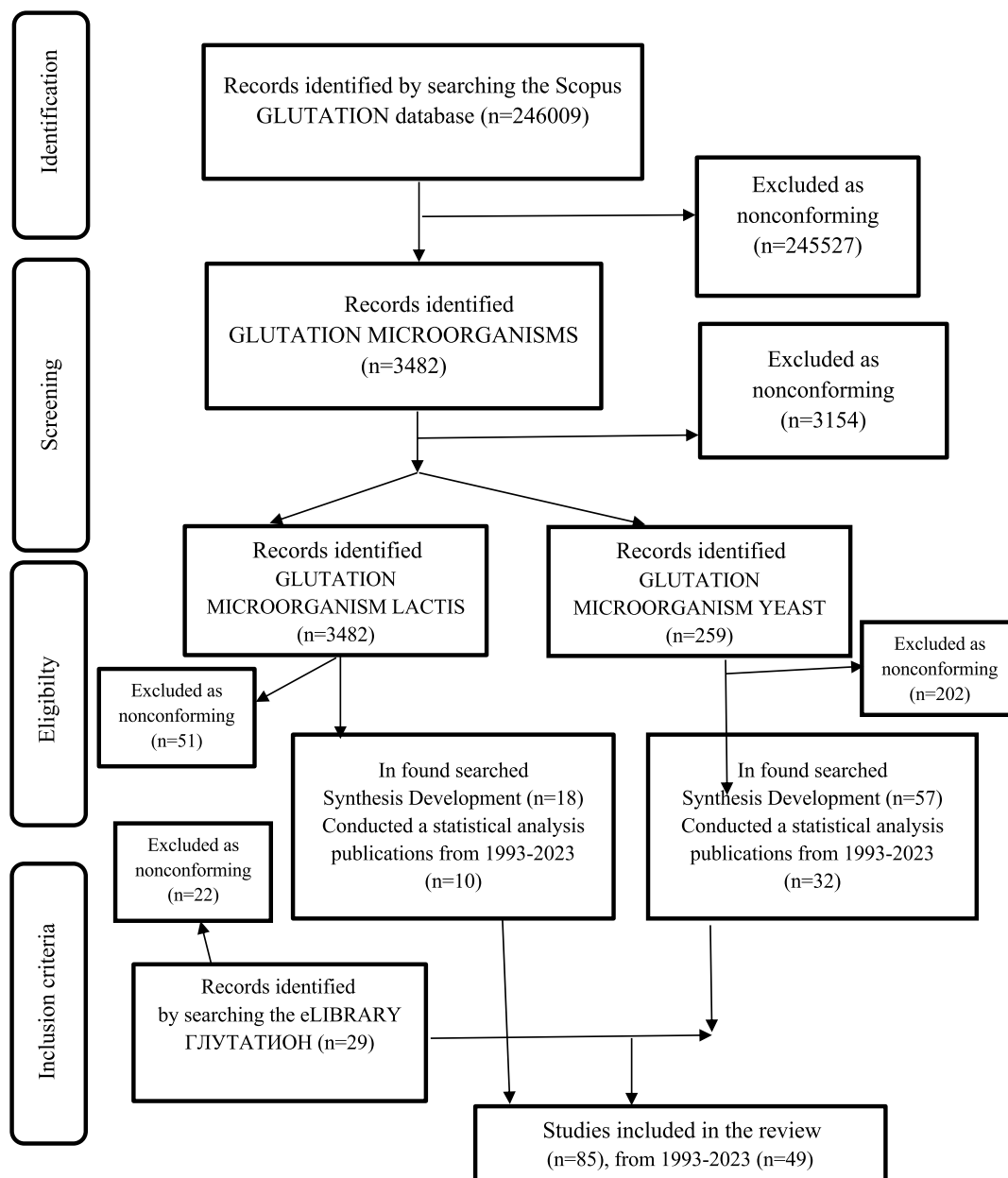
Извлечение данных

Скрининг и извлечение данных осуществлялись четырьмя авторами, при этом возникшие расхождения устранялись посредством обсуждения и достижения

консенсуса при участии рецензента, специалиста в области пищевой микробиологии. Был проведен количественный контент-анализ в соответствии с поставленными исследовательскими вопросами (Рисунки 2–9), с учетом прикладного тематического аспекта, географического происхождения источника информации, отрасли знаний, данных об авторе, а также периода публикации.

Рисунок 1
Диаграмма PRISMA

Figure 1
PRISMA Diagram



Из анализируемых источников были извлечены следующие данные: имя автора, страна, год публикации, цель исследования и его результаты [указаны в колонках 1–7 Приложения А]. Первичное извлечение данных выполнялось первыми двумя авторами, после чего проверка осуществлялась двумя другими членами авторского коллектива. В случаях возникновения конфликтов, они разрешались на основе консенсуса. Если эмпирический результат упоминался в нескольких разделах статьи и в выводах, для дальнейшего анализа извлекалось одно репрезентативное утверждение.

Анализ данных

После первичной категоризации и распределения полученных данных в соответствии с целями обзора, результаты были объединены в несколько разделов. Затем была проведена повторная категоризация этих данных, с учетом их значимости для достижения исследовательских целей. Итоговая диаграмма, иллюстрирующая этот процесс, представлена в Приложении Б¹. После создания диаграммы авторы обобщили рекомендации, касающиеся синтеза глутатиона и достижения антиоксидантного эффекта, принимая во внимание специфику каждого исследуемого сектора.

В ходе анализа были рассмотрены следующие ключевые элементы: механизм синтеза глутатиона (включая клеточные процессы микроорганизмов и условия присутствия глутатионсодержащих соединений); виды микроорганизмов (грамотрицательные и грамположительные бактерии, искусственные консорциумы и природные симбиозы, клубеньковые бактерии); критерии оценки уровня глутатиона и его антиоксидантной эффективности в медицине (методы, инструменты, данные клинических испытаний); и прикладные аспекты использования глутатиона в пищевой промышленности, животноводстве и растениеводстве. Первоначально эти аспекты анализировались как отдельные направления, но позднее были объединены.

После объединения всех данных в четыре основные категории был проведен дополнительный анализ для их дальнейшей классификации. Выяснилось, что 16 результатов касались сразу нескольких категорий, таких как «механизм», «вид микроорганизмов» и «клиниче-

ские данные». Этот процесс был обсужден и согласован четырьмя авторами (КЛГ, ДГА, КЕВ, КВК) на нескольких встречах, на которых были определены наиболее значимые выводы. В ходе последующих обсуждений была проведена дополнительная работа по систематизации рекомендаций для повышения синтеза глутатиона и выявлению ограничений в критериях оценки его эффективности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Библиометрический анализ

Всего было проанализировано 4741 публикация, в обзор было включено 49 статей, удовлетворяющих, указанному в Таблице 1 и Рисунке 1, критериям поиска. Результаты аналитической обработки данных базы Scopus с 1993–2023 были произведены по ключевым словам *glutathione microorganism lactis* ($n = 10$), с исключением всех вариантов не содержащих Scientific Publications представлены на Рисунках 2–5. Результаты статистической обработки базы Scopus с 1993–2023 по ключевым словам *glutathione microorganism yeast* ($n = 32$) с исключением всех вариантов не содержащих Synthesis Development представлены на Рисунках 6–9.

Согласно данным, представленным на Рисунках 2 и 6, количество публикаций ежегодно увеличилось в два раза за период с 2018 по 2021 годы. Наибольшее число исследований и обзорных работ было проведено в Китае (Рисунки 3 и 7). Nara и Tokagi оказались наиболее активными авторами, опубликовав две и более работы по исследуемой теме (Рисунки 4 и 8). Распределение публикаций по отраслям знаний показало, что наибольший вклад был сделан в области биохимии (от 25 % до 35 %) и иммунологии (от 15 % до 18 %) по сравнению с другими научными направлениями, такими как медицина, химическая промышленность и сельское хозяйство (Рисунки 5 и 9).

Используемая методология позволила выявить ведущие тренды в рамках решения исследовательских вопросов, связанных с поиском наиболее значимых аспектов синтеза глутатиона: механизм синтеза глутатиона, виды микроорганизмов, синтезирующих глутатион, критерии оценки эффективности влияния глутатиона на живые системы; применение глутатион синтезирующих микроорганизмов в пищевой промышленности, животноводстве и растениеводстве.

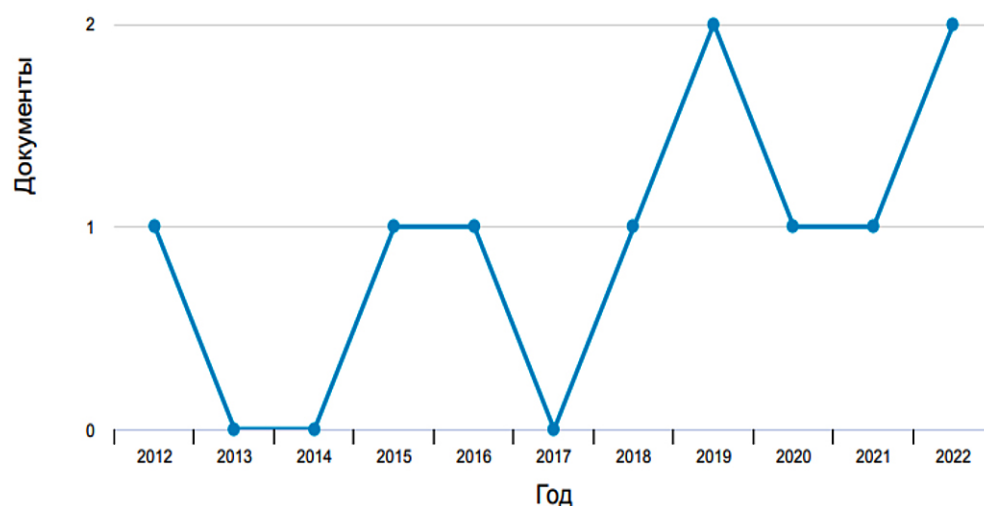
¹ Приложение Б доступно по ссылке: <https://disk.yandex.ru/i/PaqPMFFXnm1Ofg>

Рисунок 2

Документы по годам с ключевыми словами: glutathione, microorganism, lactis

Figure 2

Documents by Year with Keywords: Glutathione, Microorganism, Lactis



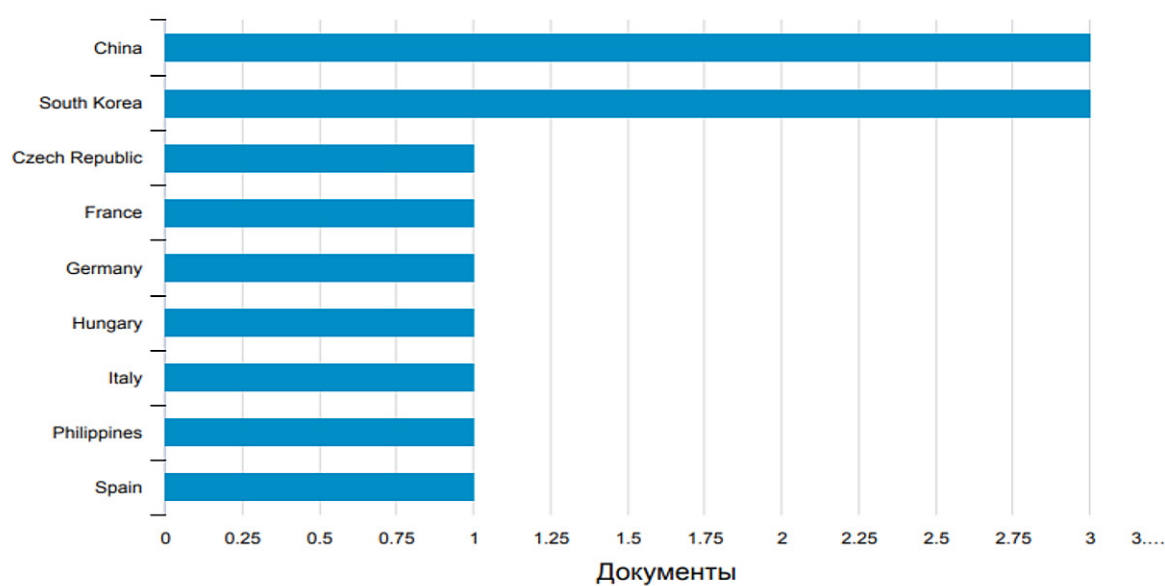
Авторские права © 2022 Elsevier B.V. Все права защищены. Scopus® является зарегистрированным товарным знаком Elsevier B.V.

Рисунок 3

Документы по странам с ключевыми словами: glutathione, microorganism, lactis

Figure 3

Documents by Country with Keywords: Glutathione, Microorganism, Lactis



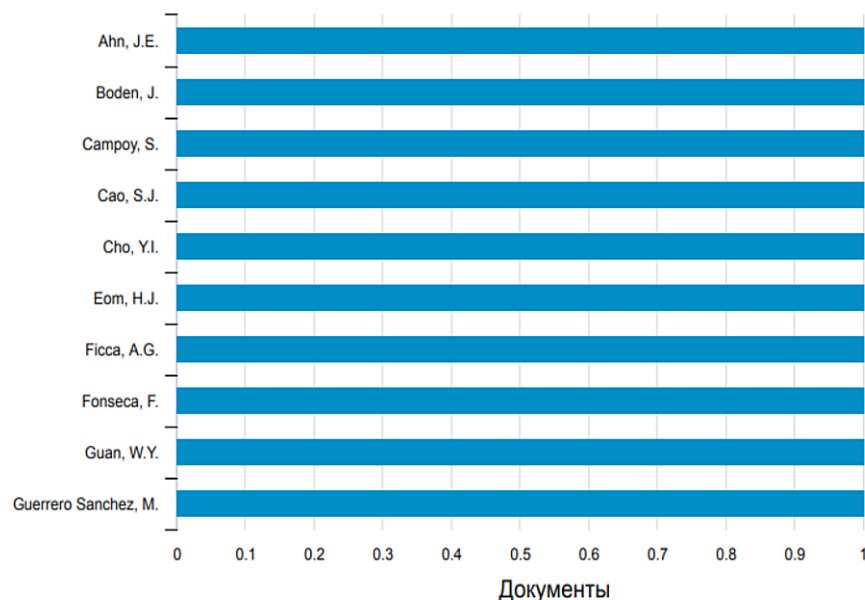
Авторские права © 2022 Elsevier B.V. Все права защищены. Scopus® является зарегистрированным товарным знаком Elsevier B.V.

Рисунок 4

Документы по авторам с ключевыми словами: glutation, microorganism, lactis

Figure 4

Documents by Authors with Keywords: Glutathione, Microorganism, Lactis



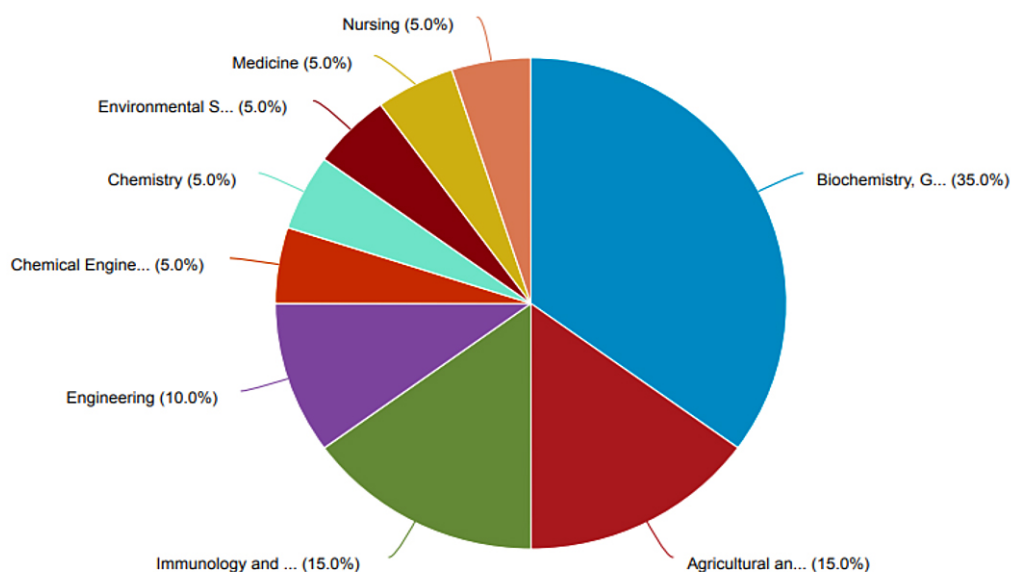
Авторские права © 2022 Elsevier B.V. Все права защищены. Scopus® является зарегистрированным товарным знаком Elsevier B.V.

Рисунок 5

Документы по отрасли знаний с ключевыми словами: glutation, microorganism, lactis

Figure 5

Documents by Field of Knowledge with Keywords: Glutathione, Microorganism, Lactis



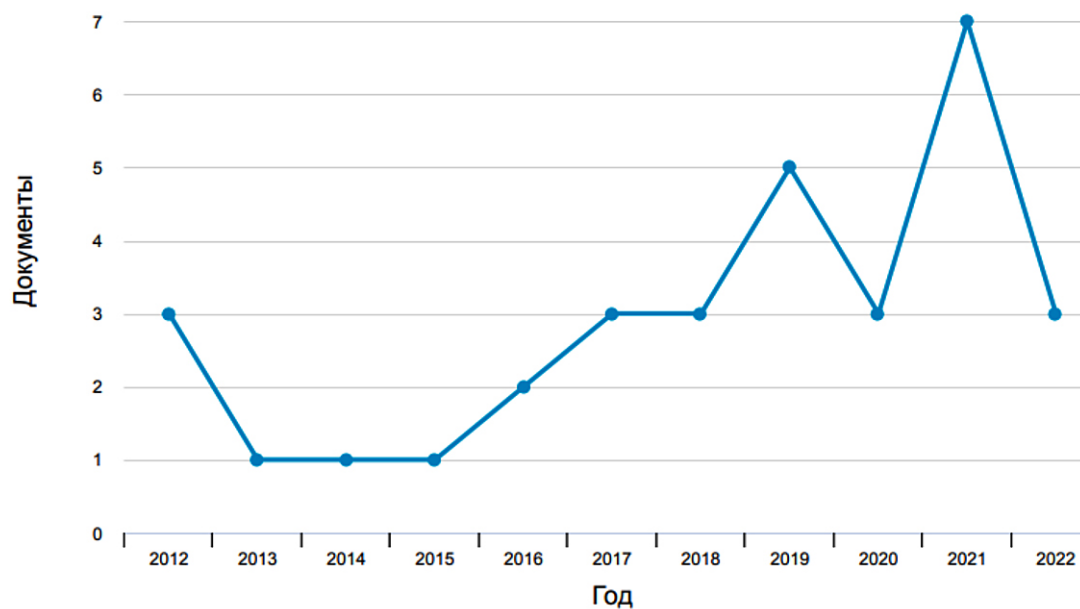
Авторские права © 2022 Elsevier B.V. Все права защищены. Scopus® является зарегистрированным товарным знаком Elsevier B.V.

Рисунок 6

Найденные документы по годам с ключевыми словами glutation, microorganism, yeast

Figure 6

Documents Found by Year with Keywords: Glutathione, Microorganism, Yeast



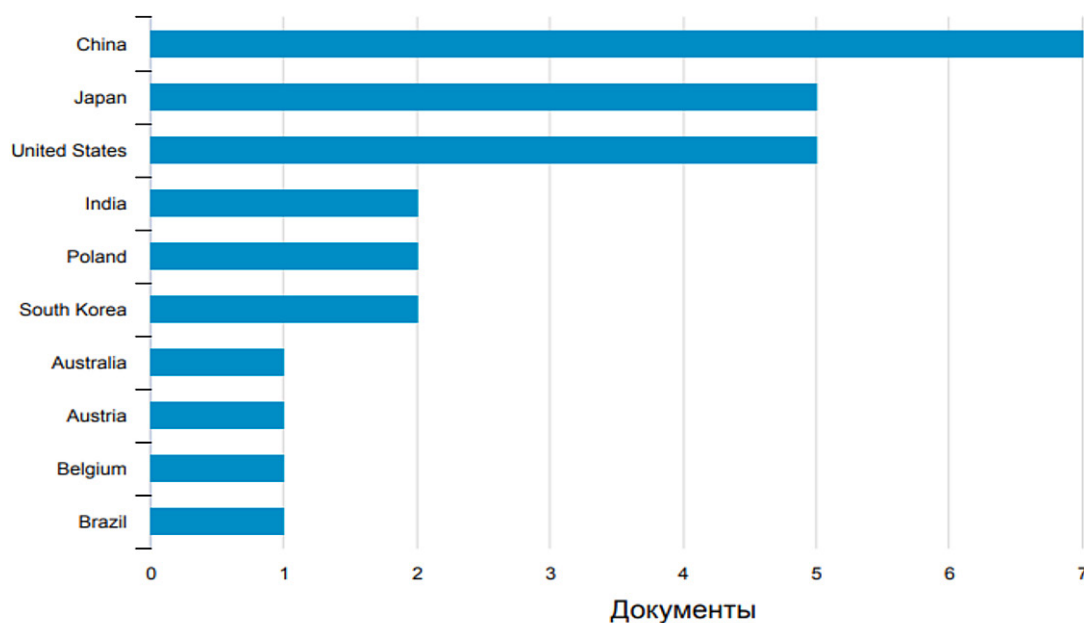
Авторские права © 2022 Elsevier B.V. Все права защищены. Scopus® является зарегистрированным товарным знаком Elsevier B.V.

Рисунок 7

Документы по странам или территориям с ключевыми словами: glutation, microorganism, yeast

Figure 7

Documents by Country or Territory with Keywords: Glutathione, Microorganism, Yeast



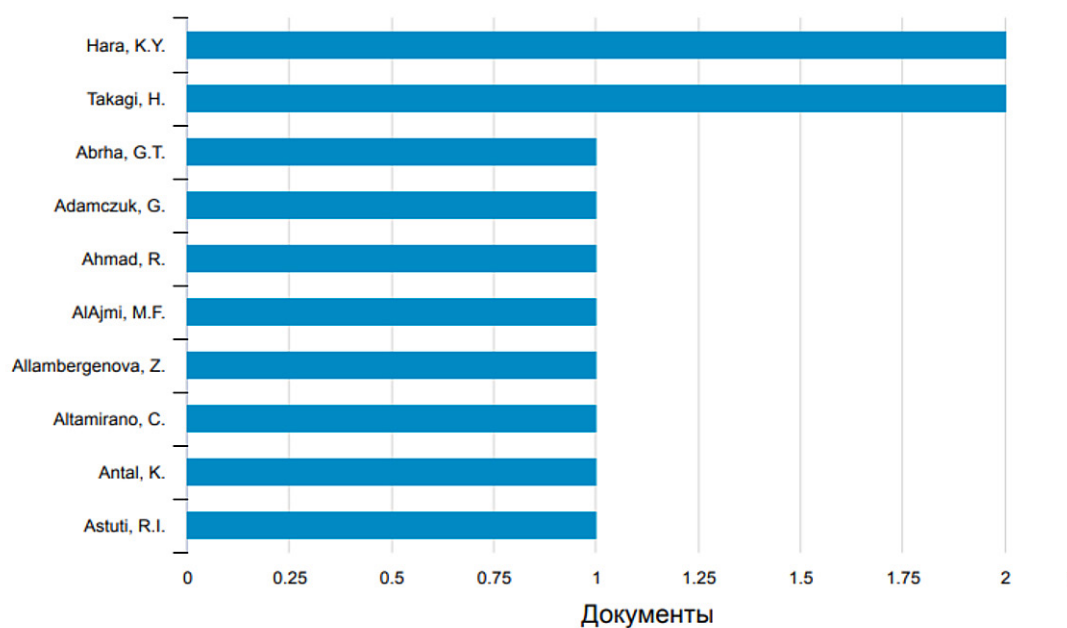
Авторские права © 2022 Elsevier B.V. Все права защищены. Scopus® является зарегистрированным товарным знаком Elsevier B.V.

Рисунок 8

Документы по авторам с ключевыми словами: glutation, microorganism, yeast

Figure 8

Documents by Authors with Keywords: Glutathione, Microorganism, Yeast



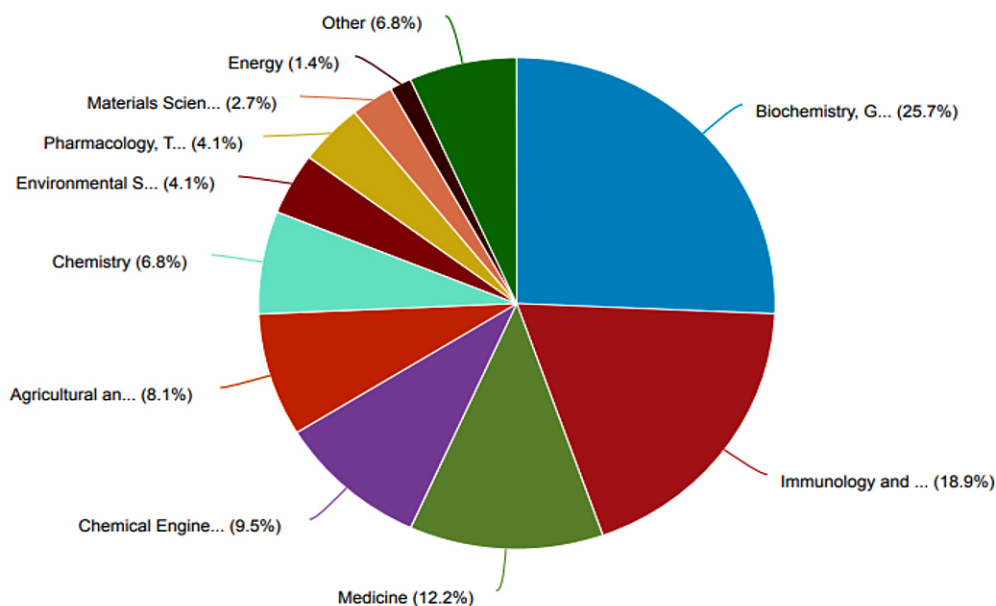
Авторские права © 2022 Elsevier B.V. Все права защищены. Scopus® является зарегистрированным товарным знаком Elsevier B.V.

Рисунок 9

Документы по отрасли знаний с ключевыми словами: glutation, microorganism, yeast

Figure 9

Documents by Field of Knowledge with Keywords: Glutathione, Microorganism, Yeast



Авторские права © 2022 Elsevier B.V. Все права защищены. Scopus® является зарегистрированным товарным знаком Elsevier B.V.

Механизм синтеза глутатиона

Несмотря на значительный прогресс в изучении процессов биосинтеза глутатиона, ряд аспектов его синтеза в клетке остается недостаточно исследованным и требует дальнейшего анализа. Например, неспособность некоторых видов бактерий синтезировать глутатион была опровергнута рядом исследований, продемонстрировавших синтез глутатионредуктазы (Pophaly et al., 2017; Revathi et al., 2013). Это объясняется наличием у бактерий бифункционального слитого белка, который участвует в биосинтезе глутатиона и позволяет эффективно реализовать антиоксидантные функции в организме животных.

В контексте механизмов синтеза, была опровергнута гипотеза Pophaly и соавторов (2012), утверждавшая, что *S. thermophilus* синтезирует глутатион посредством бифункционального слитого белка GshF. Исследования показали, что другие микроорганизмы, такие как *Lb. plantarum*, *Lb. casei*, *Lb. rhamnosus*, *Lb. sakei* и *Lb. ruminis*, также обладают этим слитым белком, хотя синтез глутатиона у этих видов не был подтвержден (Meng et al., 2022; Shah et al., 2020; Suo et al., 2021; Ran et al., 2020; Ge et al., 2021; Lin et al., 2018; Lambo et al., 2021). Однако, как отмечают Pophaly и соавторы (2012) и Zhang и соавторы (2007), вышеупомянутые виды способны синтезировать глутатионсодержащие ферменты глутатион пероксидазу и глутатион S-трансферазу при добавлении глутатиона в питательную среду или при использовании сывороточных белков (Fernandes & Steele, 1993; Rahman et al., 2012; Колесов и соавт., 2016; Дерибо и соавт., 2018; Stephen & Jamieson, 1996).

Низкий уровень глутатиона у некоторых прокариот может быть связан с его использованием в качестве резервного источника углерода в условиях голодания клеток (Barnabás Csaba Gila et al., 2021; Taté et al., 2012). Глутатион экскретируется из клетки и с помощью γ -глутамилтранспептидазы, расположенной на внешней мембране, расщепляется с образованием γ -глутаминовой кислоты (Смирнов & Суховская, 2014). Этот процесс подчеркивает, что наличие глутатиона свидетельствует о достаточном уровне цистеина, и наоборот, что изменяет традиционные представления о роли цистеина и поведения клетки в стрессовых условиях.

Был установлен механизм снижения уровня глутатиона, синтезируемого микроорганизмами, при наличии таких металлов, как свинец, кадмий и медь, в питатель-

ной среде (De Benedetto et al., 2014; Ran et al., 2020). Авторами одного из предыдущих обзоров опровергнуто утверждение, что использование селена, являющегося предшественником глутатионпероксидазы, всегда приводит к повышению уровня этого фермента, поскольку значительное превращение селенита в формы селена, связанные с клетками, было обнаружено лишь у некоторых бактерий, таких как *E. faecium* и *B. animalis* ssp. *Lactis* (Pusztahelyi et al., 2015). Кроме того, при культивировании микроорганизмов следует учитывать, что обнаружение низкого содержания глутатиона в некоторых клетках может быть связано с его истощением вследствие кислотного или осмотического стресса (Wu et al., 2021).

Виды микроорганизмов, синтезирующих глутатион

При анализе видов микроорганизмов у которых изучен синтез глутатиона (см. Приложения А и Б) установлено, что к бактериям, в большом количестве синтезирующих глутатион с можно уверенно отнести *Lactobacillus plantarium* SCS4 (Meng et al., 2022), *Streptococcus thermophilus*, *L. fermentum* ME-3 (Pophaly et al., 2017; Kullisaar et al., 2010), дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* (Luikenhuis et al., 1998), *Millerozyma farinosa*, *Pediococcus acidilactici* и *Acidilactici* (Shah et al., 2020), *Rhizobium etli* (Taté et al., 2012), *L. casei* (Pophaly et al., 2012), *L. plantarum* NJAU-01 (Ge et al., 2021), *L. plantarum* AR113, AR501, *Pediococcus pentosaceus* AR243 (Lin et al., 2018), *L. plantarum* FLPL05 (Yu et al., 2020), *L. paracasei* H4-11 и *K. marxianus* L1-1 (Liu et al., 2021).

Если сравнивать молочнокислые бактерии и дрожжи: *Saccharomyces cerevisiae*, *Millerozyma farinosa* и дикие штаммы дрожжей, то последние выделяют и накапливают внеклеточный глутатион наиболее активно. Данное вещество им необходимо для предотвращения теплового повреждения, защиты от перепада pH среды (Laman Trip & Youk, 2020). Обнаружено, что накопление GSH в дрожжевых клетках во время роста и обезвоживания биомассы для производства закваски, помогает штаммам преодолевать стрессовые условия. При этом, чем выше содержание глутатиона, тем более лояльными становятся дрожжи к отсутствию питательных веществ и температуре культивирования. Эти данные могут быть использованы для повышения производительности ферментеров.

Критерии оценки эффективности влияния глутатиона на живые системы

Ферментированные микроорганизмами пищевые продукты является недооцененным объектом повышения уровня глутатиона. Доказательством этого является наличие значительного массива данных по результатам клинических исследований в условиях проведения медицинских экспериментов (Приложение Б).

Обзор источников показал, что объектами исследований, проведенных после 2012 года, по сравнению с теми, что были сделаны с 1993 по 2011 гг, все чаще становится человек и прикладные области медицины. Очевидным, как показали исследования, является тот факт, что расход глутатиона повышается в стрессовых условиях как у людей, так и у животных. Это вещество участвует в довольно широком спектре стресс-зависимых явлений: сердечно-сосудистые заболевания, ухудшение зрения, воспаление суставов, неврологические расстройства, заболевания легких, почек, печени, болезни репродуктивной системы, включая мужское и женское бесплодие и т.д. (Rahman et al., 2012).

Большинство экспериментальных результатов вносят значительный вклад в доказательную базу, подтверждающую эффективность воздействия ферментированных продуктов питания в предотвращении развития оксидативного стресса в организме (Fernandes & Steele, 1993; Rahman et al., 2012; Колесов и соавт., 2016; Дерибо и соавт., 2018; Stephen & Jamieson, 1996; Pusztahelyi et al., 2015). Недостаток глутатиона ассоциируется с клеточными повреждениями, апоптозом и прогрессированием таких заболеваний, как сахарный диабет, преждевременное старение и онкологические патологии (Bramer et al., 2017; Stern et al., 2021; Ge et al., 2021; Izanloo et al., 2021; Zhao & Shah, 2016; Lin et al., 2018; Меледина и соавт., 2020; Hu et al., 2020; Meng et al., 2022) [см. Приложения А и Б].

Некоторые стрессовые факторы приводят к ускоренному потреблению восстановленной формы глутатиона в организме, например, алкогольная интоксикация. Это связано с повышением скорости катаболизма цистеина до таурина при введении этилового спирта, что значительно снижает уровень восстановленного глутатиона в клетках печени (Топтыгина, 2012; Ефременко и соавт., 2019). В меньшей степени, по сравнению с воздействием алкоголя, физическая нагрузка также способствует снижению уровня глутатиона (Колесов и соавт., 2016).

Применение глутатион синтезирующих микроорганизмов в пищевой промышленности, животноводстве и растениеводстве

Внедрение микроорганизмов, синтезирующих глутатион, в различные сферы пищевой промышленности, такие как виноделие, мясопереработка и молочная промышленность, сегодня осуществляется параллельно с тестированием их на различных животных моделях. Было установлено, что ферментация кормов способствует повышению антиоксидантной активности молока и увеличению срока хранения кормов. Ферментация злаков, фруктов, овощей, мяса и рыбы приводит к обнаружению в них антигипертензивных пептидов и предшественников глутатиона (Melini et al., 2019). Лактобактерии, введенные в корм животных, показали, согласно анализу экспрессии регуляторных генов, повышение антиоксидантной активности не только у самих подопытных животных (мышей и ягнят), но и улучшение качества их мяса (Yu et al., 2020; Lin et al., 2018; Ge et al., 2021). Глутатион также изменяет органолептические характеристики вина (Alfonzo et al., 2021) и способствует сохранению активности клеток при обезвоживании дрожжевой биомассы (Binati et al., 2022). Даже незначительное повышение уровня глутатиона может существенно изменить гомеостаз бактерий и грибов, а также свойства продуктов на их основе (Gila et al., 2021). При изучении *L. casei* CRL 431 были выявлены метаболиты, способные модулировать антиоксидантную защиту и нейтрализовать повреждения, вызванные окислительным стрессом, индуцированным AFB1 (Aguilar-Toalá et al., 2019; Zhao et al., 2019; Shah et al., 2020). Эти данные подтверждают положительное влияние на здоровье животных и биохимию конечного продукта, полученного с использованием данной культуры. Также были определены параметры, при которых глутатион значительно продлевает срок хранения пищевых и косметических продуктов (Feng & Wang, 2020; Миледина и соавт., 2020).

Источниками глутатиона в клетках микроорганизмов и продуктах могут являться его предшественники — определенные компоненты сырья животного и растительного происхождения. В частности, была изучена возможность повышения уровня глутатиона в питательной среде за счет введения молочного лактоферрина (Креккер и соавт., 2021). Доказано, что ферментирован-

ные продукты, содержащие предшественники глутатиона, способствуют его доставке в организм человека (Porphaly et al., 2012).

Научные исследования сместили фокус с чистых культур, синтезирующих глутатион, на анализ антиоксидантной активности естественных симбиозов, таких как кефирные и тибетские грибки. Выживаемость таких симбиозов в окружающей среде выше благодаря повышенному содержанию глутатиона (Tang et al., 2018). Некоторые исследователи предлагают создание целевых консорциумов, синтезирующих глутатион (Slattery et al., 2019; Taté et al., 2012), а также использование электромагнитного излучения для увеличения синтеза глутатиона. В работе Креккер с соавторами (2022) предшественник глутатиона глицин и СВЧ-излучение мощностью 560 Вт способствовали увеличению содержания глутатиона в биомассе симбиотической закваски кумыса на 99 % по сравнению с контролем.

Кроме того, установлено, что глутатион способствует укреплению симбиотических связей клубеньковых микроорганизмов с растениями. В растительном сырье был найден гомолог глутатиона — гомоглутатион (Иванова и соавт., 2022), который участвует в процессах развития и адаптации к стрессу в растениях. Интересным для изучения является результат, демонстрирующий снижение содержания активных форм кислорода в клетках растений параллельно с исчезновением гомоглутатиона, что открывает перспективы для культивирования симбиозов анаэробных и аэробных бактерий.

Антиоксидантное действие глутатиона обусловлено его способностью удалять свободные радикалы, хелатировать прооксидантные ионы металлов и регулировать активность соответствующих ферментов (Liu et al., 2021; Олескин & Шендеров, 2020). Однако большинство авторов описывают параметры антиоксидантного действия глутатиона недостаточно конкретно. Объективная оценка антиоксидантной активности ферментированных продуктов рассматривается как интегральный показатель, отражающий не только действие глутатиона, но и других связанных с ним соединений, таких как ферменты, витамины и микроэлементы (Колесов и соавт., 2016; Feng & Wang, 2020).

Результаты анализа были представлены в виде диаграммы предметного поля, которая приведена в Приложении Б. Нумерация источников в Приложении Б соответствует Приложению А к данной публикации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данном обзоре предметного поля было проанализировано 3482 журнальных статьи и отобрано из них 49, которые содержат полезную информацию о понимании роли глутатиона микрофлоры в формировании антиоксидантного ответа организма, а также факторах, ограничивающих синтез глутатиона в условиях стресса.

Несмотря на то, что анализ проведенных исследований показал, что глутатионовая антиоксидантная система эффективно защищает клетки от оксидативного стресса и может влиять на суммарный пул биоантиоксидантов, поступающих вместе с ферментированной пищей, ее значимость в ряде метаболических адаптационных процессов молочнокислых бактерий, дрожжей и симбиозов культур остается до конца невыясненной, в том числе ученым пока не удалось определить точные параметры влияния глутатион синтезирующих микроорганизмов на уровень этого антиоксиданта в сыворотки крови.

Исследования в области оценки эффективности микрофлоры, связанной с синтезом глутатиона, в публикациях, отобранных для обзора, демонстрируют возрастающий интерес к этому процессу во всем мире. Несмотря на то, что существующие обзоры относительно способности и механизма синтеза глутатиона микроорганизмами были в каждом случае сконцентрированы на решении узкоспециализированных задач, в совокупности, полученная информация помогла интегрировать всесторонний обзор предметного поля и выделить ведущие тренды полученной информации, не сформированные ранее, как значимые звенья алгоритма эффективного синтеза глутатиона микроорганизмами: механизм синтеза; виды микроорганизмов, критерии оценки эффективности, область применения результатов исследований. Анализ этих трендов показал, что в сравнении с ранее проведенными исследованиями, можно выделить также новые важные прикладные результаты применения микроорганизмов, синтезирующих глутатион:

- (1) возможность противостояния вирусным инфекциям (Laman Trip & Youk, 2020; Zhao & Shah, 2016; Zhao et al., 2019, Wendel, 2022, Varlamova et al., 2017, Nyman et al., 2018, Mbye et al., 2020, Ge et al., 2021; Lin et al., 2018, Lambo et al., 2021);
- (2) длительное сохранение естественных симбиозов и консорциумов микроорганизмов при наличии

достаточного содержания глутатиона (Slattery et al., 2019; Tang et al., 2018; Slattery et al., 2019, Taté et al., 2012);

- (3) установление способности гомолога глутатиона увеличивать симбиотические связи клубеньковых микроорганизмов и растений (Иванова и соавт., 2022).

Настоящий обзор, несмотря на широкий охват и концептуальную направленность, не позволяет сделать окончательные выводы о полной эффективности восстановления уровня глутатиона в условиях стресса. Тем не менее, проведенный анализ выделенных научных направлений выявил важные аспекты, которые играют значимую роль в этом процессе. Эти выводы создают возможности для корректировки будущих исследований с целью минимизации ошибок и углубления понимания механизмов, связанных с повышением уровня глутатиона.

Во-первых, результаты показывают, что алиментарное повышение уровня глутатиона возможно даже при наличии стрессовых факторов. Это свойство присуще как грамположительным, так и грамотрицательным микроорганизмам, что расширяет перспективы их применения. Во-вторых, обзор демонстрирует значимость ряда штаммов микроорганизмов, обладающих активной способностью к синтезу глутатиона. Эти штаммы могут применяться не только для производства ферментированных продуктов и кормов, но и для противодействия вирусным инфекциям. Особенно важны консорциумы микроорганизмов, которые проявляют более выраженные антиоксидантные свойства по сравнению с отдельными культурами. Их роль в поддержании микробиологических экосистем человека и окружающей среды открывает перспективные направления для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию синтеза глутатиона. Третье ключевое наблюдение заключается в том, что расширение границ исследований и выявление существующих ограничений подтвердили гипотезу авторов обзора: утверждения о низкой эффективности ферментированных продуктов в вопросах повышения антиоксидантного статуса и противовирусной защиты организма часто являются необоснованными, что связано со сложным многофакторным характером данного процесса. Для окончательного разрешения этого вопроса необходимо проведение дополнительных клинических исследований и разработка объективных критериев оценки.

Одной из главных проблем оценки эффективности глутатиона является отсутствие четких и унифицированных критериев для измерения его антиоксидантной активности. Этот вопрос особенно остро стоит в научной литературе. Несмотря на наличие отдельных публикаций, использующих разнообразные методы оценки, в большинстве работ эта тема недостаточно проработана, что ограничивает возможности для получения достоверных данных. Еще одним существенным аспектом является отсутствие общепринятых стандартов оценки антиоксидантной активности глутатиона или микроорганизмов, его синтезирующих. Это может быть связано с тем, что термины «антиоксидант» и «стрессоустойчивость» до сих пор не обладают четко определенными характеристиками. Разработка стандартов и методов оценки антиоксидантной активности способствовала бы устранению существующих пробелов в исследованиях и предложению более точных инструментов для изучения влияния различных факторов на уровень глутатиона в микроорганизмах и ферментируемых ими продуктах.

Ограничения исследования

Во-первых, выбор публикаций был ограничен доступностью источников и временными рамками анализа, что, безусловно, повлияло на полноту представленной информации. Несмотря на то, что в обзор были включены работы, опубликованные с 1993 по 2023 годы, региональная ограниченность данных и доступность публикаций могли привести к упущению важных исследований, особенно из менее освещенных в литературе регионов.

Во-вторых, отсутствие стандартизированных критериев для оценки антиоксидантной активности глутатиона и микроорганизмов, его синтезирующих, значительно затруднило сопоставление данных между различными исследованиями. В большинстве изученных работ не было четко определено, какие методологические подходы следует использовать для унифицированной оценки эффективности, что, в свою очередь, осложнило интерпретацию полученных результатов и выявление универсальных закономерностей.

Третьим важным ограничением является дефицит объективных и стандартизированных критериев для оценки воздействия ферментированных продуктов и кормов на антиоксидантный статус живых организмов. Кли-

нические исследования, несмотря на их значимость, остаются фрагментарными и зачастую ограничиваются специфическими аспектами изучаемой проблемы, что снижает возможность междисциплинарного анализа и обобщения результатов.

Кроме того, географическая и языковая ограниченность обзора, сосредоточенного на публикациях на английском и русском языках, могла привести к исключению ряда релевантных источников, опубликованных на других языках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном обзоре предметного поля проведен всесторонний анализ публикаций, касающихся способности микроорганизмов, синтезирующих глутатион, изменять антиоксидантный статус человека и животных. Центральное внимание было уделено изучению механизмов синтеза глутатиона определенными микроорганизмами и объективных методов оценки его антиоксидантной эффективности как в живых системах, так и в ферментированных продуктах и кормах. В результате были выявлены ключевые тренды, касающиеся процесса биосинтеза глутатиона, факторов, способствующих его поддержанию или снижению в различных условиях, а также важные ограничения, с которыми сталкиваются современные исследования в этой области.

На основе проведенного анализа становится очевидным, что для достижения более точных выводов о роли глутатиона в условиях стресса и вирусных угроз необходимы дальнейшие комплексные исследования. Стандартизация понятий антиоксидантной активности глутатиона и микроорганизмов, его синтезирующих, позволила бы улучшить оценку эффективности данного процесса и расширить спектр практического применения этих данных. Данный пробел в литературе особенно заметен в исследованиях, проведенных в России и других странах, где объем работ по данной теме остается ограниченным.

Практическое значение выявленных данных заключается в открытии перспектив применения глутатиона для улучшения органолептических характеристик, продления срока хранения и повышения антиоксидантных свойств ферментированных продуктов и кормов. Подтверждение того, что экзогенный глутатион способен поддерживать симбиотическую эффективность консорциумов микроорганизмов, предполагает дальнейшее

углубление исследований в данной области, особенно в контексте сохранения природных микробиомов. Это создает значительные перспективы для продолжения работы в этом направлении, с целью как научных открытий, так и практического внедрения результатов в пищевую промышленность, сельское хозяйство и медицину.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность кандидату исторических наук Тихоновой Елене Викторовне за помощь в подготовке рукописи в соответствии с требованиями к обзорам предметного поля.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Креккер Людмила Геннадьевна: концептуализация; разработка методологии исследования; работа с программным обеспечением; редактирование рукописи.

Донская Галина Андреевна: научное руководство исследованием; предоставление учебных материалов; курирование данных; написание — подготовка черновика рукописи.

Колосова Елена Вячеславовна: написание-рецензирование и редактирование рукописи; визуализация; проведение исследований.

Карапетян Вараздат Карленович: программное обеспечение; валидация данных; редактирование рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Lyudmila G. Krekker: conceptualization; development of methodology; working with software; writing — editing.

Galina A. Donskaya: scientific supervision; provision of educational materials; data curation; writing — original draft.

Elena V. Kolosova: writing — review & editing; visualization; investigation.

Varazdat K. Karapetyan: software; validation; writing — editing.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Дерибо, А. В., Бажуров, А. Ю., Марзан, О. С., & Корсак, М. А. (2018). Оксидативный стресс и антиоксидантный статус у пациентов с осложнённым уролитиазом. *Молодой ученый*, 14(200), 112–114.
- Deribo, A. V., Bayurov, A. Yu., Marzan, O. S., & Korsak, M. A. (2018). Oxidative stress and antioxidant status in patients with complicated urolithiasis. *Young Scientist*, 14(200), 112–114.
- Ефременко, Е. С., Жукова, О. Ю., Титов, Д. С., Никонов, Д. А., Сидоров, Г. Г., & Андреев, К. А. (2019). Глутатион-зависимые механизмы антиоксидантной защиты при алкоголизме. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 4, 105–108.
- Efremenko, E. S., Zhukova, O. Yu., Titov, D. S., Nikonov, D. A., Sidorov, G. G., & Andreev, K. A. (2019). Glutathione-dependent mechanisms of antioxidant protection in alcoholism. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 4, 105–108.
- Иванова, К. А., Чернова, Е. Н., Кулаева, О. А., Цыганова, А. В., Кусакин, П. Г., Русских, И. В., Тихонович, И. А., & Цыганов, В. Е. (2022). Регуляция гороха (*Pisum sativum* L.). Симбиотическая клубеньковая инфекция и защитные реакции с помощью глутатиона, гомоглутатиона и их соотношения. *Наука о растениях*, 13, 843565. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.843565>
- Ivanova, K. A., Chernova, E. N., Kulaeva, O. A., Tsyganova, A. V., Kusakin, P. G., Russkikh, I. V., Tikhonovich, I. A., & Tsyganov, V. E. (2022). Regulation of pea (*Pisum sativum* L.). Symbiotic nodule infection and defense responses using glutathione, homoglutathione, and their ratio. *Frontiers in Plant Science*, 13, 843565. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.843565>
- Колесов, С. А., Рахманов, Р. С., Блинова, Т. В., Страхова, Л. А., Чумаков, Н. В., & Пискарев, Ю. Г. (2016). Особенности функционирования системы глутатиона при физических нагрузках и влияние на нее алиментарных факторов. *Спортивная медицина: наука и практика*, 7(2), 39–45. <https://doi.org/10.17238/ISSN2223-2524.2017.2.39>
- Kolesov, S. A., Rakhmanov, R. S., Blinova, T. V., Strakhova, L. A., Chumakov, N. V., & Piskarev, Y. G. (2016). Features of the glutathione system during physical exertion and the influence of dietary factors. *Sports Medicine: Science and Practice*, 7(2), 39–45. <https://doi.org/10.17238/ISSN2223-2524.2017.2.39>
- Креккер, Л. Г., Донская, Г. А., & Колосова, Е. В. (2021). Изучение антиоксидантной и витаминсинтезирующей активности продукта «КуЭМсил» как потенциального антистрессового фактора. *Пищевая промышленность*, 11, 22–25. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.11.11.015>
- Krekker, L. G., Donskaya, G. A., & Kolosova, E. V. (2021). Study of antioxidant and vitamin-synthesizing activity of the product “KuEMsil” as a potential anti-stress factor. *Food Industry*, 11, 22–25. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.11.11.015>
- Креккер, Л. Г., Донская, Г. А., Колосова, Е. В., & Дрожжин, В. М. (2022). Влияние глицина в составе модифицированной питательной среды на динамику антиоксидантной активности биомассы. *Молочная промышленность*, 8, 46–49. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2022-08-46-49>
- Krekker, L. G., Donskaya, G. A., Kolosova, E. V., & Drozhzhin, V. M. (2022). Effect of glycine in the composition of a modified nutrient medium on the dynamics of antioxidant activity of biomass. *Dairy Industry*, 8, 46–49. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2022-08-46-49>
- Кулинский, В. И., & Колесниченко, Л. С. (2010). Глутатион, ядра клетки и его функции. *Биомедицинская химия*, 56(6), 657–662. <https://doi.org/10.18097/pbmc20105606657>
- Kulinsky, V. I., & Kolesnichenko, L. S. (2010). Glutathione, cell nuclei, and its functions. *Biomedical Chemistry*, 56(6), 657–662. <https://doi.org/10.18097/pbmc20105606657>
- Меледина, Т. В., Морозов, А. А., Давыденко, С. Г., & Терновский, Г. В. (2020). Дрожжи — продуценты глутатиона. *Техника и технология пищевых продуктов*, 1, 140–148. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-140-148>
- Meledina, T. V., Morozov, A. A., Davydenko, S. G., & Ternovsky, G. V. (2020). Yeasts - producers of glutathione. *Food Processing: Techniques and Technology*, 1, 140–148. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-140-148>
- Олескин, А. В., & Шендеров, Б. А. (2020). Пробиотики, психобиотики и метабиотики: проблемы и перспективы. *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация*, 2(3), 233–243. <https://doi.org/10.36425/rehab25811>
- Oleskin, A. V., & Shenderov, B. A. (2020). Probiotics, psychobiotics, and metabiotics: problems and prospects. *Physical and Rehabilitation Medicine, Medical Rehabilitation*, 2(3), 233–243. <https://doi.org/10.36425/rehab25811>
- Смирнов, Л. П., & Суховская, И. В. (2014). Роль глутатиона в функционировании систем антиоксидантной защиты и биотрансформации (обзор). *Ученые записки Петрозаводского гос. университета. Серия: Естественные и технические науки*, 6(143), 34–40.
- Smirnov, L. P., & Sukhovskaya, I. V. (2014). The role of glutathione in the functioning of antioxidant defense

- and biotransformation systems (review). *Scientific Notes of Petrozavodsk State University. Series: Natural and Technical Sciences*, 6(143), 34–40.
- Тихонова, Е. В., & Шленская, Н. М. (2021). Обзор предметного поля как метод синтеза научных данных. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (3), 11–25. <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.257>
- Tikhonova, E. V., & Shlenskaya, N. M. (2021). Scoping review as a method for synthesizing scientific data. *Storage and Processing of Farm Products*, (3), 11–25. <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.257>
- Топтыгина, О. А. (2012). Роль глутатиона в системе антиоксидантной защиты (обзор). *Acta Biomedica Scientifica*, 2(84), 178–180.
- Toptygina, O. A. (2012). The role of glutathione in the antioxidant defense system (review). *Acta Biomedica Scientifica*, 2(84), 178–180.
- Aguilar-Toalá, J. E., Astiazarán-García, H., Estrada-Montoya, M. C., Garcia, H. S., Vallejo-Cordoba, B., González-Córdova, A. F., & Hernández-Mendoza, A. (2018). Modulatory Effect of the Intracellular Content of *Lactobacillus casei* CRL 431 Against the Aflatoxin B1-Induced Oxidative Stress in Rats. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 11(2), 470–477. <https://doi.org/10.1007/s12602-018-9433-8>
- Alfonzo, A., Prestianni, R., Gaglio, R., Matraxia, M., Maggio, A., Naselli, V., Craparo V., Badalamenti, N., Bruno, M., Vagnoli, P., Settanni, L., Moschetti, G., & Francesca, N. (2021). Effects of different yeast strains, nutrients and glutathione-rich inactivated yeast addition on the aroma characteristics of Catarratto wines. *International Journal of Food Microbiology*, 360, 109325. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109325>
- Binati, R. L., Larini, I., Salvetti, E., & Torriani, S. (2022). Glutathione production by non-Saccharomyces yeasts and its impact on winemaking: A review. *Food Research International*, 156, 111333. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111333>
- Bramer, W. M., Rethlefsen, M. L., Kleijnen, J., & Franco, O. H. (2017). Optimal Database Combinations for Literature Searches in Systematic reviews: a Prospective Exploratory Study. *Systematic Reviews*, 6(1), 245. <https://doi.org/10.1186/s13643-017-0644-y>
- Câmara, A. A., Jr. Nguyen, T. D., Saurel, R., Sandt, C., Peltier, C., Dujourdy, L., & Husson, F. (2020). Biophysical stress responses of the yeast *Lachancea thermotolerans* during dehydration using Synchrotron-FTIR microspectroscopy. *Frontiers in Microbiology*, 11, 899. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00899>
- Chen, Q., Kong, B., Sun, Q., Dong, F., & Liu Q. (2015). Antioxidant potential of a unique LAB culture isolated from Harbin dry sausage: In vitro and in a sausage model. *Meat Science*, 110, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.07.021>
- Copley, S.D., & Dhillon, J.K. (2002). Lateral gene transfer and parallel evolution in the history of glutathione biosynthesis genes. *Genome Biology*, 3(5), research0025.1. <https://doi.org/10.1186/gb-2002-3-5-research0025>
- De Benedetto, M. L., Capo, C. R., Ferri, A., Valle C., Polimanti, R., Carrì, M. T. & Rossi, L. (2014). Glutaredoxin 1 is a major player in copper metabolism in neuroblastoma cells. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1840(1), 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2013.09.008>
- Dubina, M. V., Gomonova, V. V., & Taraskina, A. E. (2021). Pathogenesis-based preexposure prophylaxis associated with a low risk of SARS-CoV-2 infection in healthcare workers at a designated COVID-19 hospital: A pilot study. *BMC Infect Dis* 21, 536. <https://doi.org/10.1186/s12879-021-06241-1>
- Feng, T., & Wang, J. (2020). Oxidative stress tolerance and antioxidant capacity of lactic acid bacteria as probiotic: a systematic review. *Gut Microbes*, 12(1), 1801944. <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1801944>
- Ge, Q., Yang, B., Liu, R., Jiang, D., Yu, H., Wu, M., & Zhang, W. (2021). Antioxidant activity of *Lactobacillus plantarum* NJAU-01 in an animal model of aging. *BMC Microbiology*, 21(1), 182. <https://doi.org/10.1186/s12866-021-02248-5>
- Gila, B. C., Moon, H., Antal, K., Hajdu, M., Kovács, R., Jónás, A. P., Pusztahelyi, T., Yu, J. H., Pócsi, I., & Emri, T. (2021). The DUG pathway governs degradation of intracellular glutathione in *Aspergillus nidulans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 87(9), e01321–20. <https://doi.org/10.1128/AEM.01321-20>
- Grażyna, C., Hanna, C., Adam, A., & Magdalena, B.M. (2017). Natural antioxidants in milk and dairy products. *International Journal of Dairy Technology*, 70, 165–178. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12359>
- Horowitz, R. I., Freeman, P. R., & Bruzzese, J. (2020). Efficacy of glutathione therapy in relieving dyspnea associated with COVID-19 pneumonia: A report of 2 cases. *Respiratory Medicine Case Reports*, 30, 101063. <https://doi.org/10.1016/j.rmcr.2020.101063>
- Hu, J., Zhong, X., Yan, J., Zhou, D., Qin, D., Xiao, X., Zheng, Y., & Liu, Y. (2020). High-throughput sequencing analysis of intestinal flora changes in ESRD and CKD patients. *BMC Nephrology*, 21(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s12882-019-1668-4>
- Izanloo, H., Soleimanzadeh, A., Bucak, M. N., Imani, M., & Zhandi, M. (2021). The effects of varying concentrations of glutathione and trehalose in improving microscopic and oxidative stress parameters in Turkey semen during liquid storage at 5 °C. *Cryobiology*, 101, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2021.07.002>

- Jamieson, D. J. (1995). The effect of oxidative stress on *Saccharomyces cerevisiae*. *Redox Report: Communications in Free Radical Research*, 1(2), 89–95. <https://doi.org/10.1080/13510002.1995.11746964>
- Kolesnikov, S. (2020). COVID-19: Oxidative stress and the relevance of antioxidant therapy. *Vestnik Rossijskoj Akademii Meditsinskikh Nauk. Rossijskaia Akademiia Meditsinskikh Nauk*, 75, 318–325. <https://doi.org/10.15690/vramn1360>
- Kullisaar, T., Songisepp, E., Aunapuu, M., Kilk, K., Arend, A., Mikelsaar, M., Rehema, A., & Zilmer, M. (2010). Complete glutathione system in probiotic *Lactobacillus fermentum* ME-3. *Prikladnaia Biokhimiia i Mikrobiologija*, 46(5), 527–531.
- Kullisaar, T., Zilmer, M., Mikelsaar, M., Vihalemm, T., Annuk, H., Kairane, C., & Kilk, A. (2002). Two antioxidative lactobacilli strains as promising probiotics. *International Journal of Food Microbiology*, 72(3), 215–224. [https://doi.org/10.1016/s0168-1605\(01\)00674-2](https://doi.org/10.1016/s0168-1605(01)00674-2)
- Laman Trip, D. S., & Youk, H. (2020). Yeasts collectively extend the limits of habitable temperatures by secreting glutathione. *Nature Microbiology*, 5(7), 943–954. <https://doi.org/10.1038/s41564-020-0704-2>
- Lambo, M. T., Chang, X., & Liu, D. (2021). The recent trend in the use of multistrain probiotics in livestock production: An overview. *Animals*, 11(10), 2805. <https://doi.org/10.3390/ani11102805>
- Lei, S., Jiang, F., Su, W., Chen, C., Chen, J., Mei, W., Zhan, L. Y., Jia, Y., Zhang, L., Liu, D., Xia, Z. Y., & Xia, Z. (2020). Clinical characteristics and outcomes of patients undergoing surgeries during the incubation period of COVID-19 infection. *EClinicalMedicine*, 21, 100331. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2020.100331>
- Fernandes, L., & Steele, J. L. (1993). Glutathione content of lactic acid bacteria. *Journal of Dairy Science*, 76(5), 1233–1242. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77452-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77452-4)
- Li, Y., Wie, G., & Chen, J. (2004). Glutathione: A review on biotechnological production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 66(3), 233–242. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1751-y>
- Lin, X., Xia, Y., Wang, G., Xiong, Z., Zhang, H., Lai, F., & Ai, L. (2018). *Lactobacillus plantarum* AR501 alleviates the oxidative stress of D-galactose-induced aging mice liver by upregulation of Nrf2-mediated antioxidant enzyme expression. *Journal of Food Science*, 83(7), 1990–1998. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14200>
- Liu, N., Qin, L., Lu, X., Zhao, Y., & Miao, S. (2021). Fortified fermented rice-acid can regulate the gut microbiota in mice and improve the antioxidant capacity. *Nutrients*, 13(12), 4219. <https://doi.org/10.3390/nu13124219>
- Luikenhuis, S., Perrone, G., Dawes, I. W., & Grant, C. M. (1998). The yeast *Saccharomyces cerevisiae* contains two glutaredoxin genes that are required for protection against reactive oxygen species. *Molecular Biology of the Cell*, 9(5), 1081–1091. <https://doi.org/10.1091/mbc.9.5.1081>
- Martorana, A., Alfonzo, A., Gaglio, R., Settanni, L., Corona, O., La Croce, F., Vagnoli, P., Caruso, T., Moschetti, G., & Francesca, N. (2017). Evaluation of different conditions to enhance the performances of *Lactobacillus pentosus* OM13 during industrial production of Spanish-style table olives. *Food Microbiology*, 61, 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.08.007>
- Mbye, M., Baig, M. A., AbuQamar, S. F., El-Tarabily, K. A., Obaid, R. S., Osaili, T. M., Al-Nabulsi, A. A., Turner, M. S., Shah, N. P., & Ayyash, M. M. (2020). Updates on understanding of probiotic lactic acid bacteria responses to environmental stresses and highlights on proteomic analyses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(3), 1110–1124. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12554>
- Melini, F., Melini, V., Luziatelli, F., Ficca, A. G., & Ruzzi, M. (2019). Health-promoting components in fermented foods: An up-to-date systematic review. *Nutrients*, 11(5), 1189. <https://doi.org/10.3390/nu11051189>
- Meng, X., Chen, X. Z., Sun, J. Y., Zhang, Y., Jiang, L. S., & Wang, J. (2022). Exploring the oxidative stress regulation of mice with hyperglycemia by *Lactiplantibacillus plantarum* SCS4. *Current Microbiology*, 79(11), 319. <https://doi.org/10.1007/s00284-022-03008-y>
- Nyman, E., Lindqvist, P., Näslund, U., & Grönlund, C. (2018). Risk marker variability in subclinical carotid plaques based on ultrasound is influenced by cardiac phase, echogenicity and size. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 44(8), 1742–1750. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2018.03.013>
- Pophaly, S. D., Poonam, S., Pophaly, S. D., Kapila, S., Nanda, D. K., Tomar, S. K., & Singh, R. (2017). Glutathione biosynthesis and activity of dependent enzymes in food-grade lactic acid bacteria harbouring multidomain bifunctional fusion gene (gshF). *Journal of Applied Microbiology*, 123(1), 194–203. <https://doi.org/10.1111/jam.13471>
- Pophaly, S. D., Singh, R., Pophaly, S. D., Kaushik, J. K. & Tomar, S. K. (2012). Current status and emerging role of glutathione in food grade lactic acid bacteria. *Microbial Cell Factories*, 11, 114. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-11-114>
- Pusztahelyi, T., Kovács, S., Pócsi, I. & Prokisch, J. (2015). Selenite-stress selected mutant strains of probiotic bacteria for Se source production. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology: Organ of the Society for Minerals and Trace Elements (GMS)*, 30, 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.11.003>

- Rahman, T., Hosen, I., Islam, M.M., & Shekhar, H.U. (2012). Oxidative stress and human health. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 3, 997–1019. <https://doi.org/10.4236/abb.2012.327123>
- Ran, S., Liu, J., & Li, S. (2020). A systematic review of the various effect of arsenic on glutathione synthesis in vitro and in vivo. *BioMed Research international*, 2020, 9414196. <https://doi.org/10.1155/2020/9414196>
- Revathi, K., Chandrasekaran, R., Thanigaivel, A., Kirubakaran, S. A., Sathish-Narayanan, S., & Senthil-Nathan, S. (2013). Effects of *Bacillus subtilis* metabolites on larval *Aedes aegypti* L. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 107(3), 369–376. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2013.10.005>
- Sarkis-Onofre, R., Catalá-López, F., & Aromataris, E. (2021). How to properly use the PRISMA statement. *Systematic Review*, 10, 117. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01671-z>
- Shah, A. A., Liu Z., Qian C., Wu, J., Sultana, N., & Zhong, X. (2020). Potential effect of the microbial fermented feed utilization on physicochemical traits, antioxidant enzyme and trace mineral analysis in rabbit meat. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 104(3), 767–775. <https://doi.org/10.1111/jpn.13252>
- Sinha, R., Sinha, I., Calcagnotto, A., Trushin, N., Haley, J. S., Schell, T. D., & Richie, J. P. (2018). Oral supplementation with liposomal glutathione elevates body stores of glutathione and markers of immune function. *European Journal of Clinical Nutrition*, 72(1), 105–111. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2017.132>
- Slattery, C., Cotter, P. D., & O'Toole, P. W. (2019). Analysis of health benefits conferred by *Lactobacillus* species from kefir. *Nutrients*, 11(6), 1252. <https://doi.org/10.3390/nu11061252>
- Stephen, D. W., & Jamieson, D. J. (1996). Glutathione is an important antioxidant molecule in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *FEMS Microbiology Letters*, 141(2–3), 207–212. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1996.tb08386.x>
- Stern, C., Lizarondo, L., Carrier, J., Godfrey, C., Rieger, K., Salmond, S., Apostolo, J., Kirkpatrick, P., & Loveday, H. (2021). Methodological guidance for the conduct of mixed methods systematic reviews. *JBI Evidence Implementation*, 19(2), 120–129. <https://doi.org/10.1097/XEB.0000000000000282>
- Suo, K., Chen, S., Li, X., Liu, X., Yi, J., Zhu, J., Lu, L., Hao, L., Kang, Q., & Lu, J. (2021). Radioprotective effect of radiation-induced *Lactococcus lactis* cell-free extract against 60Coγ injury in mice. *Journal of Dairy Science*, 104(9), 9532–9542. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20291>
- Tang, W., Li, C., He, Z., Pan, F., Pan, S., & Wang, Y. (2018). Probiotic properties and cellular antioxidant activity of *Lactobacillus plantarum* MA2 isolated from Tibetan kefir grains. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 10(3), 523–533. <https://doi.org/10.1007/s12602-017-9349-8>
- Taté, R., Cermola, M., Riccio, A., Diez-Roux, G., & Patriarca, E. J. (2012). Glutathione is required by *Rhizobium etli* for glutamine utilization and symbiotic effectiveness. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 25(3), 331–340. <https://doi.org/10.1094/MPMI-06-11-0163>
- Varlamova, E. G., Goltyshev, M. V., Novoselov, V. I. & Fesenko, E. E. (2017). Cloning, intracellular localization, and expression of the mammalian selenocysteine-containing protein SELENOI (Sell) in tumor cell lines. *Doklady Biochemistry and Biophysics*, 476(1), 320–322. <https://doi.org/10.1134/S160767291705012X>
- Wendel, U. (2022). Assessing viability and stress tolerance of probiotics. A Review. *Frontiers in Microbiology*, 12, 818468. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.818468>
- Wu P., Zhu Q., Yang R., Mei Y., Chen Z. & Liang Y. (2021). Differences in acid stress response of *Lactocaseibacillus paracasei* Zhang cultured from solid-state fermentation and liquid-state fermentation. *Microorganisms*, 9(9), 1951. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091951>
- Yu X., Li Y., Wu Q., Shah N. P., Wei H. & Xu F. (2020). Genomic Analysis for Antioxidant Property of *Lactobacillus plantarum* FLPL05 from Chinese Longevity People. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 12(4), 1451–1458. <https://doi.org/10.1007/s12602-020-09704-0>
- Zhang, J., Fu, R. Y., Hugenholtz, J., Li, Y., & Chen, J. (2007). Glutathione protects *Lactococcus lactis* against acid stress. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(16), 5268–5275. <https://doi.org/10.1128/AEM.02787-06>
- Zhao, D., & Shah, N. P. (2016). Concomitant ingestion of lactic acid bacteria and black tea synergistically enhances flavonoid bioavailability and attenuates d-galactose-induced oxidative stress in mice via modulating glutathione antioxidant system. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 38, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2016.09.005>
- Zhao, X., Yi, R., Zhou, X., Mu, J., Long, X., Pan, Y., Song, J. L., & Park, K. Y. (2019). Preventive effect of *Lactobacillus plantarum* KSFY02 isolated from naturally fermented yogurt from Xinjiang, China, on d-galactose-induced oxidative aging in mice. *Journal of Dairy Science*, 102(7), 5899–5912. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-16033>