

Volume 9, Issue 1, 2026

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ
ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ
FOOD SYSTEMS

FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS
FOOD SYSTEMS

ISSN 2618-9771 (Print)

ISSN 2618-7272 (On line)

<http://www.fsjour.com>

Национальный, рецензируемый журнал посвящен основным проблемам науки о пищевой промышленности. Основной миссией является: создание, агрегация, поддержка и распространение научного контента в области пищевой промышленности, объединение усилий исследователей научных центров, университетов, преодоление разрыва между изданиями регионального, национального и федерального уровней. Журнал призван освещать актуальные проблемы в пищевой и смежных отраслях, продвигать новые перспективные технологии в широкую аудиторию научных и практических работников, преподавателей, аспирантов, студентов, предпринимателей. Научная концепция издания предполагает публикацию новых знаний в области пищевых систем и научных основ ресурсосберегающих технологий глубокой переработки сельскохозяйственного сырья, прорывных технических решений для производства пищевых продуктов общего и специализированного назначения. В журнале публикуются научные и обзорные статьи, доклады, сообщения, рецензии, краткие научные сообщения (письма в редакцию), информационные публикации по направлениям: технология пищевых производств; процессы, оборудование и аппараты пищевых производств; гигиена питания; биотехнология; стандартизация, сертификация, качество и безопасность; экономика; автоматизация и информатизация технологических процессов. Подробная информация для авторов и читателей представлена на сайте: www.fsjour.com.

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ
www.fsjour.com

Учредитель, издатель и типография
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН
109316, Москва, Талалихина, 26

РЕДАКЦИЯ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН
109316, Москва, Талалихина, 26
Тел.: +7-495-676-95-11, доб. 300
e-mail: a.zakharov@fncps.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре

Регистрационные данные:
ПИ № ФС77-71610 от 13.11.2017
ЭЛ № ФС 77-72022 от 26.12.2017
Издается с 2018 года.

Материалы публикуются на условиях лицензии CC BY 4.0

Цена свободная.
Периодичность — 4 номера в год.
Подписано в печать 30.05.2026.
Дата выхода в свет 31.03.2026.
Тираж 300 экз. Заказ № 78.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Кузнецова Оксана Александровна — Доктор технических наук, Директор, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Лисицын Андрей Борисович — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Лауреат Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники, Научный руководитель, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Семенова Анастасия Артуровна — Доктор технических наук, профессор, Заместитель директора, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

НАУЧНЫЕ РЕДАКТОРЫ:

Горлов Иван Федорович — Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, Научный руководитель, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции», Волгоград, Россия

Настасиевич Иван — Доктор, Адъюнкт-директор, Институт гигиены и технологии мяса, Белград, Сербия

Такеда Широ — Адъюнкт-профессор, Профессор лаборатории науки о пище, Институт ветеринарной медицины, Университет Азабу, Сагамихара, Япония

Просеков Александр Юрьевич — Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Ректор, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Горбунова Наталья Анатольевна — Кандидат технических наук, Ученый секретарь, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

Arif Nur Muhammad Ansori — PhD, Доктор ветеринарных наук, научный сотрудник, Университет Айрланга, Сурабая, Индонезия

Tarek Gamal Abdelmaksoud — Доктор пищевых наук, Адъюнкт-профессор Кафедры пищевых наук, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет

ВЫПУСКАЮЩИЙ РЕДАКТОР:

Захаров Александр Николаевич — Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Заведующий редакционно-издательским отделом, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, РАН, Москва, Россия

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Абрамова Любовь Сергеевна — Доктор технических наук, профессор, Заместитель директора Департамента, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия

Баженова Баяна Анатольевна — Доктор технических наук, профессор, Профессор кафедры «Технология мясных и консервированных продуктов», Восточно-Сибирский университет технологий и управления», Улан-Удэ, Россия

Галстян Арам Генрихович — Доктор, технических наук, академик РАН, Директор, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности РАН, Москва, Россия

Донник Ирина Михайловна — Доктор биологических наук, профессор, Академик РАН, Вице-президент РАН, Москва, Россия

Евдокимов Иван Алексеевич — доктор технических наук, профессор, Заведующий кафедрой «Технология молока и молочных продуктов» Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

Иванкин Андрей Николаевич — Доктор химических наук, профессор, Заведующий кафедрой «Химия», Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Мытищи, Московская область, Россия

Кочеткова Алла Алексеевна — Доктор технических наук, профессор, Руководитель лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов, Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия

Машенцева Наталья Геннадиевна — Доктор технических наук, доцент, профессор РАН, профессор, кафедра «Биотехнология и технология продуктов биорганического синтеза» Московский государственный университет пищевых производств, Москва, Россия

Мирошников Сергей Александрович — Доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Ректор, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Римарева Любовь Вячеславовна — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия

Петров Андрей Николаевич — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Директор, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Видное, Московская область, Россия

Ребезов Максим Борисович — Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Главный научный сотрудник, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

Чернуха Ирина Михайловна — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Заведующий отделом, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия



© ФНЦПС, 2026

© Авторы, 2026

ISSN 2618-9771 (Print)
ISSN 2618-7272 (Online)
DOI-prefix: 10.21323/2618-9771

The national peer reviewed journal is dedicated to the main problems of food science. The main mission is to create, aggregate, support and distribute the scientific content in the field of the food industry, join the efforts of researchers from scientific centers and universities, bridge the gap between publications at the regional, national and federal levels. The journal serves to highlight topical problems in the food and related industries, promote new promising technologies among the wide audience of scientific and practical professionals, lecturers, students, postgraduate students and entrepreneurs. The scientific concept of the journal envisages publication of new knowledge in the field of food systems and scientific foundations of the resource saving technologies for deep processing of agricultural raw materials, breakthrough technical solutions for producing food of general and specialized purpose. The journal publishes scientific and review papers, reports, communications, critical reviews, short scientific communications (letters to the editorial office), information materials concerned with food technology, processes, equipment and apparatus for food production, nutritional hygiene, biotechnology, standardization, certification, quality and safety, economics, automation and informatization of technological processes. The detailed information is given on the site: www.fsjour.com.

**Minister of Science and Higher Education
of the Russian Federation**

**V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food
Systems of Russian Academy of Sciences
(Gorbatov Research Center for Food Systems)**

**FOOD SYSTEMS
www.fsjour.com**

**Founder, Publisher and Printing Office:
Federal State Budgetary Scientific Institution
“V.M. Gorbatov Federal Research Center
for Food Systems of Russian Academy of Sciences”
Talalikhina str. 26, Moscow, Russia, 109316**

EDITORIAL OFFICE:

Federal State Budgetary Scientific Institution
“V.M. Gorbatov Federal Research Center
for Food Systems of Russian Academy of Sciences”
Talalikhina str. 26, Moscow, Russia, 109316
Tel.: +7-495-676-95-11 extension 300
e-mail: a.zakharov@fncps.ru

The Journal is registered in the Federal Service on Supervision
in the sphere of communication industry, information
technologies and public communications.

The certificate of registration is
PI № FS 77 – 71610 of 13.11.2017
EL № FS 77 – 72022 of 26.12.2017
Founded in 2018.

This work is licensed under a
Creative Commons Attribution 4.0 License
Free price.

Frequency – 4 issues a year.
Signed print 30.03.2026.

Released from press 31.03.2026.
Circulation – 300 copies. Order № 78.



ISSN 2618-9771 (Print)
ISSN 2618-7272 (Online)
DOI-prefix: 10.21323/2618-9771

© FNCPS, 2026
© Authors, 2026

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

Oxana A. Kuznetsova, Doctor of technical sciences, Director, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Andrey B. Lisitsyn, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Scientific supervisor, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

Anastasiya A. Semenova, Doctor of technical sciences, Professor, Deputy Director, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

SCIENTIFIC EDITORS:

Ivan F. Gorlov, Doctor of agricultural sciences, Professor, Academician of RAS, Scientific supervisor of Povolzhskiy Research Institute of Production and Processing of Meat and Dairy Products, Volgograd, Russia

Ivan Nastasijevic, Doctor, Associate Director, Institute of Meat Hygiene and Technology, Belgrad, Serbia

Takeda Shiro, Associate Professor, Laboratory of Food Science School of Veterinary Medicine, Azabu University, Sagami-hara, Japan

Aleksandr Yu. Prosekov, Doctor of technical sciences, Professor, Corresponding member of RAS, Rector, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Natalia A. Gorbunova, Candidate of technical sciences, Academic Secretary, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Arif Nur Muhammad Ansori, Doctor, Doctor in Veterinary Sciences, Researcher, Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia

Tarek Gamal Abedelmaksoud, PhD of Food Science, Associate Professor, Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt

PRODUCTION EDITOR:

Aleksandr N. Zakharov, Candidate of technical sciences, Senior research worker, Head of the Department of Editorial and Publishing, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Liubov S. Abramova, Doctor of technical sciences, Professor, Deputy Director of the Department, Russian Federation Research Institute of Fishery and Oceanography, Moscow, Russia

Baiana A. Bazhenova, Doctor of technical sciences, Professor, Professor of the chair «Meat and canned product technology» of East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

Aram G. Galstyan, Doctor of technical sciences, Academician of RAS, Director, All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia

Irina M. Donnik, Doctor of biological sciences, Professor, Academician of RAS, Vice president of RAS, Moscow, Russia

Ivan A. Evdokimov, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the chair “Technology of milk and dairy products”, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

Andrey N. Ivankin, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the chair of Chemistry, Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi, Moscow region, Russia

Alla A. Kochetkova, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the «Laboratory of food biotechnologies and specialized products», Federal Research Centre of nutrition, biotechnology and food safety, Moscow, Russia

Natal'ya G. Mashentseva, Doctor of technical sciences, Professor RAS, Professor, Chair of Biotechnology and Technology of Products of Bioorganic Synthesis, Moscow State University of Food Production, Moscow, Russia

Sergey A. Miroshnikov, Doctor of biological sciences, Professor, Corresponding member of RAS, Rector, Orenburg State University, Orenburg, Russia

Liubov V. Rimareva, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Chief Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – branch Federal Research Centre of nutrition, biotechnology and food safety, Moscow, Russia

Andrey N. Petrov, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Director, All-Russian Research Institute of Canning Technology – Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, Vidnoe, Moscow region, Russia

Maxim B. Rebezov, Doctor of agricultural sciences, Professor, Chief Researcher, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Irina M. Chernukha, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Head of the Department, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

Бабич О. О., Тихонов С. Л., Чернуха И. М., Сухих С. А., Тихонова Н. В., Сысуев Е. Б. НЕЙРОПРОТЕКТОРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПЕТИДОМИМЕТИКА НА МОДЕЛИ <i>IN VITRO</i>	4
Mohammed A. Falih, Qausar Hamed Alkaisy, Ammar B. Altemimi, Tarek Gamal Abedelmaksoud TRACKING SHELF-LIFE DETERMINANTS IN SOFT, SEMI-HARD, AND HARD CHEESES: A QUALITY PERSPECTIVE	14
Нициевская К. Н., Станкевич С. В., Бородай Е. В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПЛОДАХ <i>SORBUS AUCUPARIA</i> НЕСТАНДАРТНЫМИ МЕТОДАМИ	25
Кручинин А. Г., Спирина М. Е. АМИНОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ГИДРОЛИЗАТОВ СЫВОРОТОЧНЫХ БЕЛКОВ, ФРАКЦИОНИРОВАННЫХ КАСКАДНО-СЕЛЕКТИВНОЙ МЕМБРАННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ	32
Колпакова В. В., Гайворонская И. С., Гулакова В. А., Семенов Г. В., Пурикова Н. В., Сеницын А. П. ФЕРМЕНТАТИВНЫЙ СИНТЕЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ И ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА	44
Белявская И. Г., Дубцова Г. Н., Осипчук И. Р. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА ХРАНЕНИЯ ПШЕНИЧНО-КЕДРОВОЙ МУКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ АНТИОКСИДАНТНОЙ ЕМКОСТИ	54
Vima P. Pratama, Aswin R. Khairullah, Ilma F. Ma'ruf, Dea A. A. Kurniasih, Mohammad Sukmanadi, Imam Mustofa, Adeyinka O. Akintunde, Riza Z. Ahmad, Annise Proboningrat, Bantari W. K. Wardhani, Angel J. B. Yuri, Lulum Leliana, Arif N. M. Ansori, Desi L. H. Utomo, Anggun K. Nikmah, Wita Yulianti MYRICETIN AS A THERAPEUTIC AGENT: MOLECULAR RESEARCHES AND CLINICAL POTENTIAL	62
Карлова Н. А., Паюрова Е. Н., Галактионова Е. А. ПОТЕРИ В ЦЕПОЧКЕ ПОСТАВОК МОЛОКА В РОССИИ	78
Кулиев З. В., Якубов К. Г., Алиев Э. М. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОЦЕССА СБИВАНИЯ СЛИВОК В МАСЛОИЗГОТОВИТЕЛЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С РАБОЧИМ ОРГАНОМ ТИПА ЛЕНТЫ МЁБИУСА	86
Rodica Siminiuc, Dinu Țurcanu FRESH ELDERBERRY OR SPINACH PURÉES AS DUAL NATURAL COLOUR AND EARLY TEXTURE MODULATORS IN SORGHUM GLUTEN-FREE BREAD	98
Кудинов Р. Е., Кременевская М. И., Ситникова В. Е., Федоров А. В. ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ СТАБИЛИЗАТОРА И ВРЕМЕНИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ НА ХРАНЕНИЕ СВЕКОЛЬНОГО СОКА	106
Утьянов Д. А., Вострикова Н. Л., Гутнов А. В., Захарова В. А., Иванов А. А., Полищук Е. К. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИСФЕНОЛОВ В ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ МЕТОДОМ ГХ-МС	119
Гладышева М. С., Молодкина Н. Р. ТРЕНДЫ И ТЕМАТИЧЕСКИЕ КЛАСТЕРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ <i>HERMETIA ILLUCENS</i> В ЦИРКУЛЯРНОЙ БИОЭКОНОМИКЕ	129
Yolani Syaputri, Anisa Mariah Bariz, Rita Kusmiati, Indri Wulandari, Sri Rejeki Rahayu, Ratu Safitri, Hitoshi Iwahashi EXPLORING THE RICHNESS OF INDONESIAN FERMENTED FOODS: PRESERVATION, NUTRITION, AND HEALTH BENEFITS	138

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-4-13>



Поступила 11.10.2025

Поступила после рецензирования 31.10.2026

Принята в печать 15.01.2026

© Бабич О. О., Тихонов С. Л., Чернуха И. М., Сухих С. А.,

Тихонова Н. В., Сысуюев Е. Б., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

НЕЙРОПРОТЕКТОРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПЕТИДОМИМЕТИКА НА МОДЕЛИ *IN VITRO*

Бабич О. О.¹, Тихонов С. Л.^{2,3,4*}, Чернуха И. М.⁴, Сухих С. А.¹, Тихонова Н. В.², Сысуюев Е. Б.⁵

¹Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Калининград, Россия

²Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

³Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

⁴Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

⁵Филиал «Всероссийский научно-исследовательский и испытательный институт медицинской техники» Федеральной службы по надзору в сфере здравоохранения в г. Екатеринбург, Екатеринбург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

окислительный стресс, болезнь Паркинсона, биоактивные вещества, биопептиды, молекулярная пептидная трансплантация

В статье рассматриваются нейропротекторные эффекты пептидомиметика CC-18 с последовательностью CTKSICTKKTLRCTPPIC, полученной методом молекулярной пептидной трансплантации. Цель исследования — оценить влияние пептидомиметика на уровень активных форм кислорода (АФК) в митохондриях клеток нейробластомы человека (SH-SY5Y) при окислительном стрессе, вызванном ротеноном. Синтез пептидомиметика проводился методом твердофазного синтеза Fmoc (SPPS) с последующей очисткой с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Влияние пептидомиметика на жизнеспособность клеток SH-SY5Y оценивали в диапазоне концентраций от 5 до 150 мкг/мл методом МТТ-теста. Также было проведено прогнозирование биологических свойств пептида с использованием баз данных Cybase, APD и ADMET. Результаты показали, что пептидомиметик CC-18 обладает нейропротекторным действием, которое заключается в снижении уровня АФК в митохондриях клеток SH-SY5Y. Механизм действия пептидомиметика связан с активацией экспрессии генов, ответственных за антиоксидантную защиту, таких как SOD1, SOD3, NQO1, GSS и GAPDH. Это способствует предотвращению гибели нейронов. Полученные данные подтверждают потенциал пептидомиметика CC-18 как эффективного антиоксидантного средства для профилактики и лечения нейродегенеративных заболеваний, связанных с окислительным стрессом. Перспективным направлением являются исследования, доказывающие эффективность пептидомиметика CC-18 в клинической практике.

Received 11.10.2025

Accepted in revised 31.10.2026

Accepted for publication 15.01.2026

© Babich O. O., Tikhonov S. L., Chernukha I. M., Sukhoi S. A.,

Tikhonova N. V., Sysuev E. B., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

NEUROPROTECTIVE EFFECTS OF A PEPTIDOMIMETIC ON AN *IN VITRO* MODEL

Babich O. O.¹, Tikhonov S. L.^{2,3,4*}, Chernukha I. M.⁴, Sukhoi S. A.¹, Tikhonova N. V.², Sysuev E. B.⁵

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

²Ural State Agricultural University, Yekaterinburg, Russia

³Ural State Forestry Engineering University, Yekaterinburg, Russia

⁴V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

⁵Branch of the “Russian Scientific and Research Institute for Medical Engineering of the Federal Service for Surveillance of Healthcare in Yekaterinburg, Yekaterinburg, Russia

KEYWORDS:

oxidative stress, Parkinson's disease, bioactive substances, peptidomimetic, molecular peptide transplantation

ABSTRACT

The article discusses the neuroprotective effects of the peptidomimetic CC-18 with the sequence CTKSICTKKTLRCTPPIC obtained by the method of molecular peptide transplantation. The aim of the study was to evaluate the effect of the peptidomimetic on the level of reactive oxygen species (ROS) in the mitochondria of human neuroblastoma cells (SH-SY5Y) under oxidative stress caused by rotenone. The peptidomimetic was synthesized by Fmoc solid-phase synthesis (SPPS) followed by purification using high performance liquid chromatography (HPLC). The effect of the peptidomimetic on viability of SH-SY5Y cells was evaluated in the concentration range from 5 to 150 micrograms/ml by the MTT test. The biological properties of the peptidomimetic were also predicted using the Cybase, APD, and ADMET databases. The results showed that the CC-18 peptidomimetic has a neuroprotective effect, reducing the level of ROS in the mitochondria of SH-SY5Y cells. The mechanism of action of the peptidomimetic is associated with the activation of expression of genes responsible for antioxidant protection, such as SOD1, SOD3, NQO1, GSS and GAPDH. This helps to prevent the death of neurons. The data obtained confirms the potential of the CC-18 peptidomimetic as an effective antioxidant agent for the prevention and treatment of neurodegenerative diseases associated with oxidative stress. A promising area of further research are studies proving the effectiveness of the CC-18 peptidomimetic in clinical practice.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бабич, О. О., Тихонов, С. Л., Чернуха, И. М., Сухих, С. А., Тихонова, Н. В., Сысуюев, Е. Б. (2026). Нейропротекторные эффекты пептидомиметика на модели *in vitro*. *Пищевые системы*, 9(1), 4–13. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-4-13>

FOR CITATION: Babich, O. O., Tikhonov, S. L., Chernukha, I. M., Sukhoi, S. A., Tikhonova, N. V., Sysuev, E. B. (2026). Neuroprotective effects of a biopeptidomimetic on an *in vitro* model. *Food Systems*, 9(1), 4–13. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-4-13>

1. Введение

Окислительный стресс (ОС) — физиологическое явление, при котором дисбаланс окислительных и антиоксидантных процессов в организме приводит к выработке избыточного количества активных форм кислорода (АФК), повреждающих клетки и способствующих развитию заболеваний. Наиболее подвержены ОС нервные клетки [1]. Возникновение некоторых нервных заболеваний тесно связано с избытком АФК и свободных радикалов в организме, в основном гидроксильного радикала (НО·), супероксид-анионного радикала $O_2^{•-}$ и радикала DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил) [2]. При избытке активных форм кислорода нарушается клеточная сигнализация, что вызывает повреждение белков и ДНК, а также инициирует пероксидацию полиненасыщенных жирных кислот. В результате дестабилизируются клеточные мембраны, что приводит к повреждению нейробластов и запуску апоптоза [3]. Окислительный стресс, сопровождающийся агрегацией белков, реактивацией клеточного цикла, апоптозом и митохондриальной дисфункцией, обнаруживается при болезни Паркинсона (БП) [4]. Из-за высокой скорости метаболизма и потребления кислорода мозг является органом, особенно уязвимым к окислительному стрессу. Хотя патофизиология нервной системы изучена не до конца, большинство исследований различных моделей нейронных расстройств, воспроизводящих важные аспекты заболевания, выявили такие ключевые элементы, как окислительный стресс, митохондриальная дисфункция, нейровоспаление и т. д. АФК запускают механизм, приводящий к нарушению функции нервных клеток и в конечном счете к нейродегенерации. Разнообразные неврологические заболевания, в том числе болезнь Альцгеймера (БА), болезнь Паркинсона, боковой амиотрофический склероз (БАС), болезнь Хантингтона (БХ), рассеянный склероз (РС) и ишемический инсульт, связаны с окислительным стрессом. Понимание влияния окислительного стресса на развитие этих заболеваний крайне важно для разработки новых методов лечения [5].

Изменение соотношения глутатион/дисульфид глутатиона (GSH/GSSG) при болезни Паркинсона указывает на то, что окислительный стресс играет ключевую роль в патогенезе гибели нервных клеток. В посмертных образцах мозга пациентов с болезнью Паркинсона количество продуктов перекисного окисления липидов примерно в 10 раз выше, чем в других областях мозга у пациентов контрольной группы того же возраста. АФК приводят к гибели нейробластом человека SH-SY5Y [4]. Следовательно, контроль и регуляция окислительного стресса могут быть перспективным терапевтическим подходом для пациентов с болезнью Паркинсона. Современные методы лечения болезни Паркинсона направлены на повышение уровня дофамина [6]. Однако эти подходы не являются долгосрочным решением, поскольку каждый из них со временем теряет эффективность по мере прогрессирования дофаминергической нейродегенерации. Неудовлетворительные результаты лечения традиционными противопаркинсоническими препаратами побудили к поиску новых альтернатив [6].

Разрабатываются превентивные стратегии, препятствующие повреждению нейронов и других структур нервной системы и способствующие сохранению когнитивных, сенсорных и двигательных функций. Исследователи изучают возможность использования антиоксидантов и других молекул, которые могут помочь защититься от окислительного стресса и предотвратить или замедлить прогрессирование заболеваний головного мозга. Расширение знаний о роли окислительного стресса в патогенезе неврологических расстройств открывает возможности для создания более эффективных методов лечения и профилактики этих заболеваний для улучшения качества жизни пациентов.

К перспективным веществам, направленным на профилактику и лечение нервных болезней, вызванных образованием АФК, относятся биологически активные пептиды (БАП) с антиоксидантными свойствами [7]. Следует отметить, что на потребительском рынке специализированные, функциональные и персонализированные продукты питания, обогащенные БАП, представлены в недостаточном ассортименте. Одной из причин является то, что пептиды, попадая в желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), подвергаются протеолизу и, соответственно, теряют биологическую активность. Поэтому в последние годы разрабатываются химические и биологические методы модификации пептидов [8,9]. Эти методы включают в себя либо нисходящие подходы, то есть выделение пептидов непосредственно из источника белка [10], либо восходящие подходы, при которых пептиды с заранее определенной последовательностью производятся с помощью химического синтеза или рекомбинантной технологии [11]. Все эти инструменты позволили собрать обширную коллекцию пептидов и разработать такие базы данных, как база данных пептидов, которая находится в свободном доступе [12].

При этом многие биотехнологические компании активно разрабатывают технологии пероральной доставки пептидов и/или проводят исследования показаний к их применению [13].

Схематическая оценка стратегий разработки пептидов для перорального введения представлена на Рисунке 1 [14].

Одним из перспективных направлений сохранения устойчивости пептида к действию протеаз и обеспечения термостабильности является встраивание пептидных последовательностей в устойчивый к протеолизу каркас. Такой метод создания новых пептидов с заданными свойствами называется молекулярная пептидная трансплантация [15]. Циклизация стала эффективным инструментом повышения стабильности пептидов и ограничения их трехмерной структуры для усиления желаемого биологического эффекта. Например, благодаря этому методу, например, гидрофобная область циклизованного аналога мелиттина осталась неизменной, что обеспечило сохранение его противомикробной активности и снижение гемолитической активности. Циклические пептиды называют пептидомиметиками или пептидами нового поколения [16].

Пептидомиметики как терапевтическое средство привлекают большое внимание из-за их способности к пероральному всасыванию и доступу к труднодоступным внутриклеточным мишеням. Авторы [17] провели химическую оптимизацию пептида, что позволило создать новый клинический препарат для перорального применения, известный как LUNA18.

Одним из примеров использования циклических пептидов в терапевтических целях является пептидомиметик циклоспорин. Он одобрен в качестве иммунодепрессанта и доступен в двух препаратах: мягкие желатиновые капсулы циклоспорина и раствор циклоспорина для приема внутрь, которые назначаются для лечения после трансплантации почек, печени и сердца. Синтезированный пептидомиметик десмопрессин, модифицированный аналог вазопрессина, был разработан в форме таблеток для лечения несахарного диабета. Десмопрессин обладает более высокой антидиуретической активностью, чем натуральный вазопрессин, и незначительной сосудосуживающей активностью. Также он обладает пролонгированным антидиуретическим действием по сравнению с нативным вазопрессином, отчасти из-за его устойчивости к деградации вазопрессиной [18]. Однако целесообразность циклизации пептидов как общей стратегии для повышения пероральной биодоступности все еще изучается. Нильсен и др. исследовали физико-химические параметры и пероральную абсорбцию 125 циклических пептидов [19].

Цель работы — оценка нейропротекторных свойств нового циклического пептидомиметика с последовательностью STKSICTKTLRTPPIC путем изучения динамики АФК в митохондриях нейробластом человека SH-SY5Y на фоне индуцированной ротеноном генерации АФК.

2. Объекты и методы

2.1. Характеристика объекта исследования

В качестве объекта исследования использовали синтезированный пептидомиметик CC-18 с последовательностью STKSICTKTLRTPPIC, разработанный на основе циклического пептида из базы данных циклических пептидов Cybase (Cybase CIS, США) с номером [Nphe5] SFTI-1(100). Синтез пептидомиметика проводился в компании Permics (Китай) с использованием твердофазного метода Fmoc, после чего осуществлялась очистка посредством высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с применением хроматографической колонки SHIMADZU Inertsil ODS-SP (SHIMADZU, Япония). Прогнозирование свойств и биодоступности пептидомиметика выполнялось на основе данных из следующих ресурсов: APD, Peptidomimetic Property Calculator (Awesome Labs LLC, США) и платформы ADMET.

Молекулярная пептидная трансплантация последовательности TKTLRT, идентифицированной с помощью молекулярного докинга в протеомных базах данных, в устойчивый к протеолизу циклический пептид [Nphe5] SFTI-1(100) позволила создать новый циклический пептидомиметик с аминокислотной последовательностью STKSICTKTLRTPPIC после выравнивания по базе данных APD. По серверу Peptidomimetic Ranker биологическая активность пептида составляет 0,668782 ед. Пептиды считаются биоактивными при показателе более 0,5 ед. Прогнозирование физико-химических свойств пептидомиметика с использованием базы данных APD позволило определить следующие характеристики: молекулярная формула $C_{83}H_{150}N_{24}O_{24}S_4$, молекулярная масса — 1996 Да, общий заряд — +4, общее гидрофобное соотношение составляет 39%. Гидрофобность пептида по Уимли-Уайту (суммарная энергия переноса пептида без остатка из воды на поверхность раздела POPC) составляет 3,23.

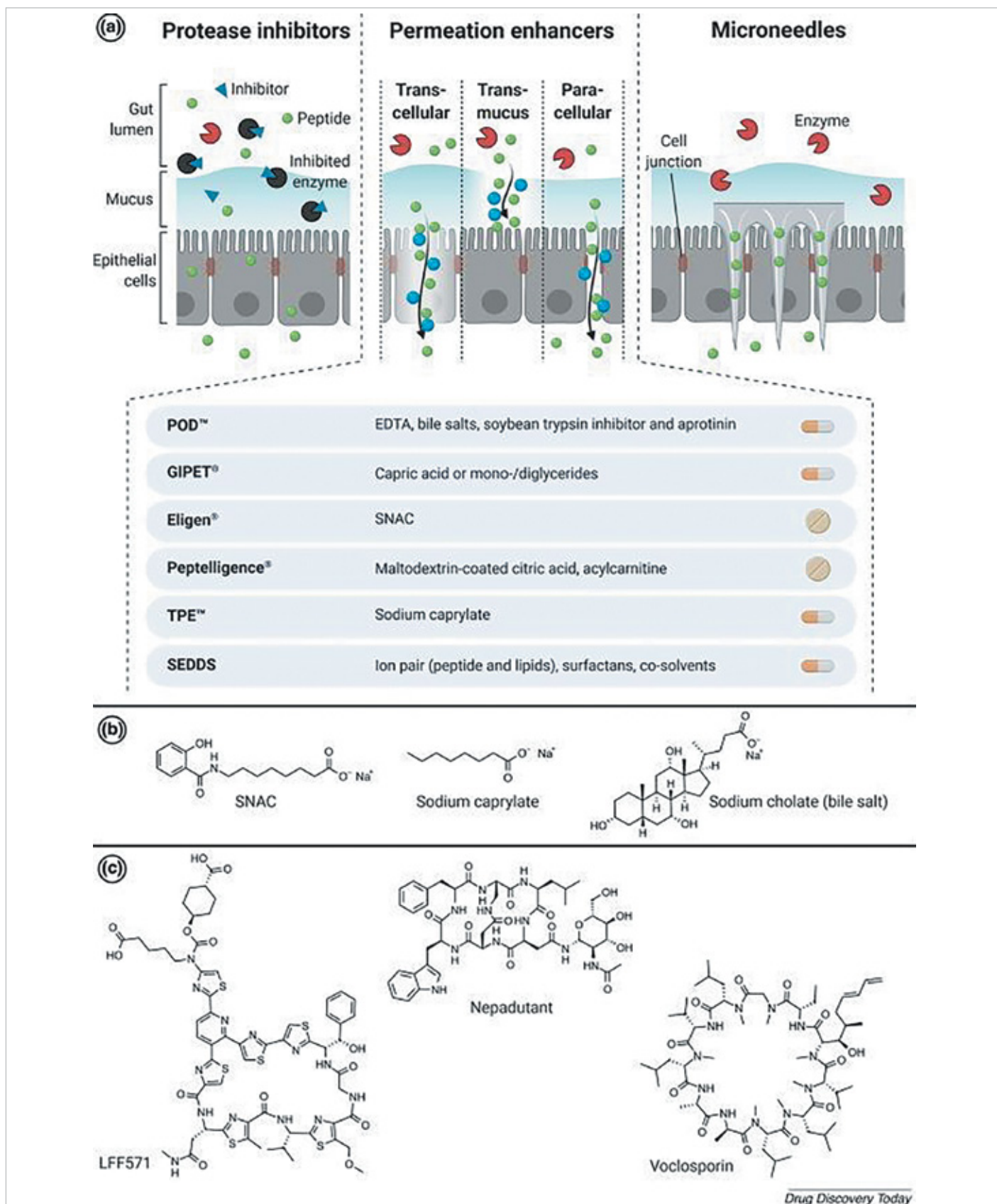


Рисунок 1. Схематическая оценка стратегий разработки пептидов для перорального введения пептидов. (a) Ингибиторы протеазы, усилители проницаемости эффективны для перорального введения пептидов. (b) Для перорального введения успешно используются усилители проницаемости, такие как салкапрозат натрия (SNAC), соли желчных кислот и каприлат натрия. Они обеспечивают прохождение молекулы через слизистый слой, клеточные мембраны и плотные соединения. (c) Химическая модификация и циклизация являются подходящими инструментами для изменения физико-химических свойств пептидов и, таким образом, применяются для перорального введения пептидов [14].

Figure 1. Schematic evaluation of the strategies for the development of peptides for oral delivery of peptides. (a) Protease inhibitors, permeation enhancers are effective for oral delivery of peptides. (b) Permeation enhancers, such as salcaprozate sodium (SNAC), bile acid salts and sodium caprylate, are successfully used for oral delivery. They enable passage of the molecule through the mucus layer, cell membranes and tight junctions. (c) Chemical modification and cyclization are suitable instruments for changing physico-chemical properties of peptides and, therefore, are used for oral delivery of peptides [14].

Потенциал связывания с белками (индекс Бомана) равен 1,4 ккал/моль. Пептидомиметик обладает хорошей растворимостью в воде, изоэлектрическая точка составляет 9,34. Значение $\log P$ равно 1,6 моль/л (оптимальный диапазон: от 0,5 до 3 моль/л), а $\log D_{7,4}$ – 0,869 логарифмических моль/л (оптимальный диапазон: от 0,5 до 3 моль/л).

Поскольку в последовательности содержится четное количество остатков Cys, пептидомиметик формирует дефениноподобную β -структуру, стабилизированную дисульфидными связями. Хроматограмма синтезированного пептидомиметика CC-18 продемонстрирована на Рисунке 2. На Рисунке 3 представлен масс-спектр пептида CC-18.

2.2. Клетки и их культивирование

Использование *in vitro* модельных систем значительно расширило возможности нейробиологии и нейронаук. Клетки в культуре представляют собой эффективную платформу для изучения функциональности белков и молекулярных механизмов, лежащих в основе конкретных явлений, для понимания патогенеза заболеваний и инфекций, а также для проведения предварительных испытаний лекарственных препаратов. В нейробиологии основными типами клеточных культур являются линии человеческих нейронных клеток. В связи с вышеизложенным в эксперименте была использована клеточная линия нейробластомы человека SH-SY5Y, которую культивировали в среде DMEM (10% эмбриональная бычья сыворотка, 1% L-глутамин, 1% пируват натрия, 1% пенициллин/стрептомицин) (Cargilcom Scientific, Германия). Условия культивирования: относительная влажность 95%, температура 37°C. Замена среды производилась каждые 3 дня в течение всего периода культивирования. Перед каждым экспериментом клетки исследовали на наличие микоплазмы.

2.3. Определение цитотоксичности CC-18

Для последующей работы с пептидомиметиком CC-18 необходимо выявить наибольшую концентрацию, при которой рост клеток либо стимулируется, либо не меняется.

Клетки были посеяны в 96-луночный планшет в количестве $0,5 \times 10^6$ клеток на лунку в 100 мкл среды. По достижении 70% конfluence к клеткам добавили CC-18 в разных концентрациях (5, 25, 50, 75, 100, 150 мкг/мл). Ротенон был добавлен как вещество, индуцирующее редокс. По данным [20], ротенон используют в экспериментах на лабораторных животных для индуцирования болезни Паркинсона.

Клетки инкубировали с экстрактами в течение двух дней. На третий день к клеткам добавили 10 мкл раствора МТТ (3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide) (конечная концентрация 0,5 мг/мл). После планшет убрали в CO_2 -инкубатор на 4 часа. Затем смесь среды и МТТ удаляли. Далее добавляли 100 мкл DMSO и убрали планшет повторно в CO_2 -инкубатор на 30 минут. Поглощение оценивали на планшетном фотометре с блоком для кювет Multiskan Spectrum (Thermo Fisher Scientific, США) при длине волны 559 нм. Каждая из экспериментальных лунок была повторена 8 раз. Эксперимент был проведен в трехкратной повторности.

2.4. Изменение количества АФК в митохондриях

Для определения относительного количества АФК был использован краситель 6-карбоксих-DCFDA (6-Карбоксих-2',7'-дихлороди-гидрофлуоресцеин диацетат). Клетки рассаживали в 24-луночный планшет в количестве 2×10^4 клеток на лунку. По достижении конfluence до 70% к клеткам добавили пептид CC-18 и ротенон в концентрации, определенной на предыдущем этапе. На третий

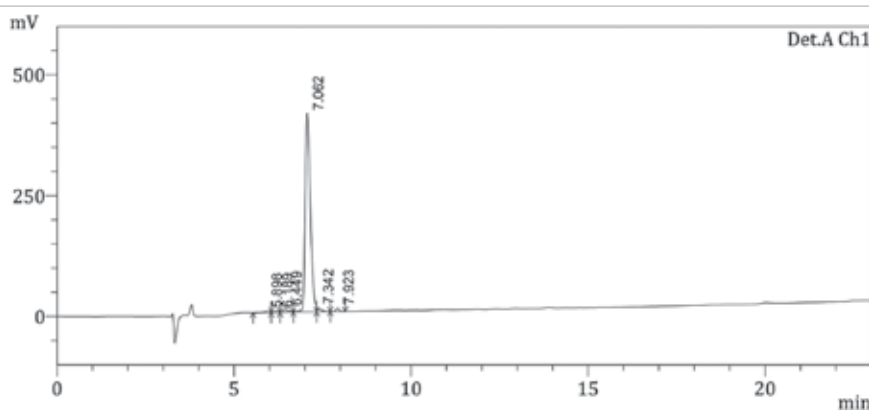


Рисунок 2. Хроматограмма пептидомиметика CC-18: по оси абсцисс — время удерживания (мин), по оси ординат — интенсивность сигнала детектора

Figure 2. Chromatogram of CC-18 peptidomimetic: on the x-axis — retention time (min), on the y-axis — detector signal intensity (mV)

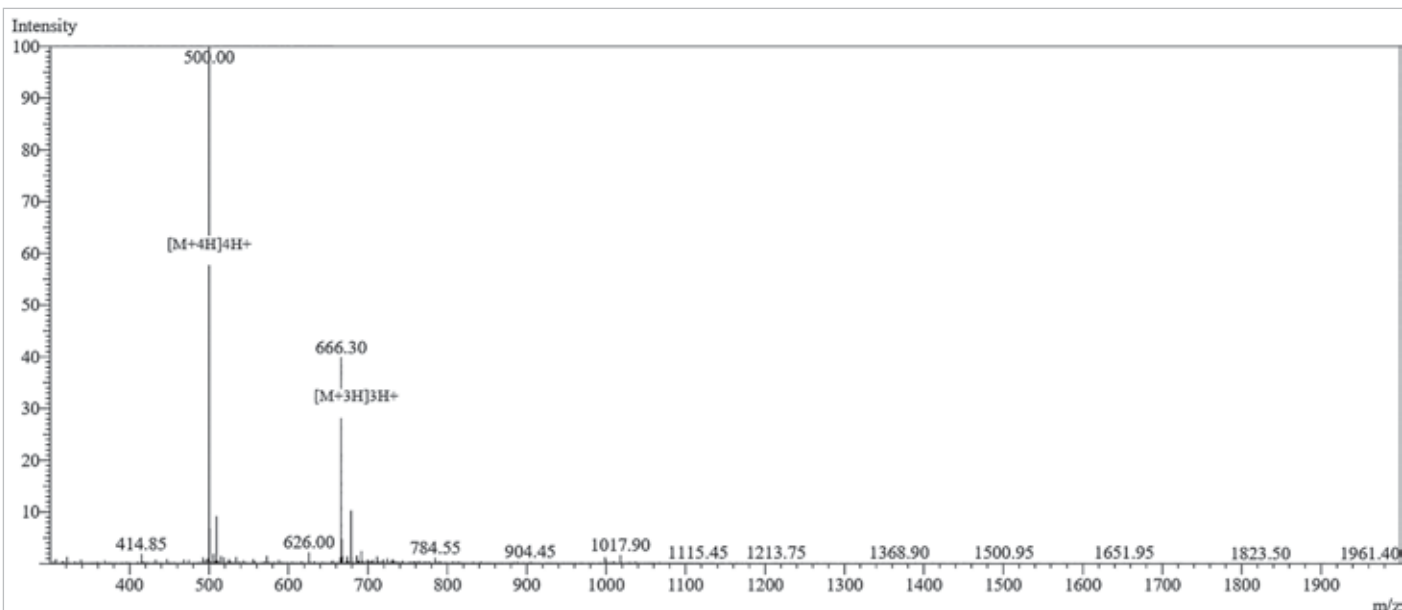


Рисунок 3. Масс-спектр пептидомиметика CC-18, на оси абсцисс m/z обозначает массу, деленную на число зарядов, на оси ординат — интенсивность пика (принята за 100)

Figure 3. Mass spectrum of the CC-18 peptidomimetic; x-axis — m/z means mass divided by the charge number, y-axis — peak intensity (taken for 100)

день культивирования у клеток собирали среду и промывали теплым раствором HBSS. Затем H_2DCFDA развели до концентрации 10 мкг/мл в DMEM ввиду ингибирования H_2DCFDA сывороткой. Наличие АФК определяли на проточном цитофлуориметре BD Fortessa (BD, США).

2.5. Изменение экспрессии маркеров накопления АФК

Клетки были засеяны в 6-луночный планшет в количестве 5×10^4 клеток на лунку. На следующий день к клеткам добавляли пептид CC-18 и ротенон по схеме, указанной ранее в концентрации. Через два дня клетки были трипсинолизированы и собраны для выделения РНК. Выделение РНК проводили с помощью реагента ExtractRNA («Евроген», Россия) по протоколу производителя. Обратная транскрипция была сделана с помощью набора SuperScript IV (Invitrogen, США), затем проводили количественную ПЦР с праймерами, указанными в Таблице 1, использовали набор 50X SYBR Green I («Евроген», Россия).

Таблица 1. Праймеры для оценки изменения экспрессии маркеров миграции

Table 1. Primers for assessing changes in expression of migration markers

Название гена	Последовательность, 5' -> 3'
GAPDH	GTCTCCTCTGACTTCAACAGCG
	ACCACCCTGTTGCTGTAGCCAA
SOD1	CTCACTCTCAGGAGACCATTGC
	CCACAAGCCAACGACTTCCAG
SOD3	ACGCTGGCGAGGACGACCTG
	GCTTCTTGGCTCTGAGTGCTC
NQO1	CCTGCCATCTGAAAGGCTGGT
	GTGGTGATGGAAGCACTGCCT
GSS	CCAAGACCGAAGGCTGTTTGTG
	TGTGACCTCTCCAGCAGTAGAC

2.6. Статистический анализ

Результаты исследований выражены в виде среднего значения \pm стандартного отклонения. Все эксперименты были повторены три раза. Результаты исследования жизнеспособности клеток линии SH-SY5Y были проанализированы с помощью метода нелинейной регрессии. В рамках остальных экспериментов для сравнения результатов использовали тест Крускала-Уоллиса.

3. Результаты и обсуждение

Клетки SH-SY5Y часто используются в качестве *in vitro* моделей для изучения функций и дифференциации нейронов. Они являются адригергическими по фенотипу, но также экспрессируют дофаминергические маркеры и поэтому используются для изучения болезни Паркинсона, нейрогенеза и других характеристик клеток мозга.

При исследовании токсичности МТТ тестом пептидомиметика CC-18 на клетках установлено, что пептидомиметик не цитотоксичен, так как во всех исследуемых вышеуказанных концентрациях гибель клеток SH-SY5Y не наблюдалась. При концентрациях пептидомиметика 5, 25, 50, 75, 100 и 150 мкг/мл отмечается достоверная пролиферация клеток на 5, 4, 5, 7, 8 и 7% ($P \leq 0,05$). Результаты исследований представлены на Рисунке 4.

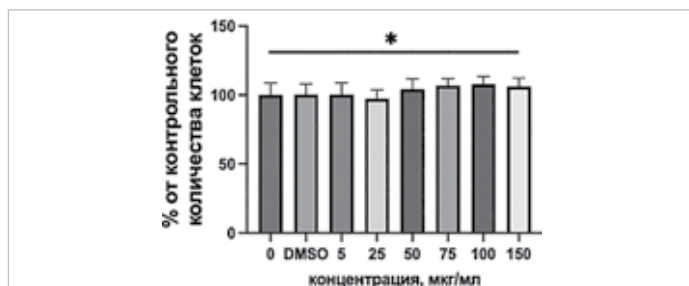


Рисунок 4. Результаты исследования токсичности пептидомиметика на клетках SH-SY5Y: статистически значимые результаты ($p < 0,05$) наблюдались при концентрации пептида 0 и 150 мкг/мл, что было подтверждено с помощью теста Крускала-Уоллиса

Figure 4. Results of the study of the toxicity of the peptidomimetic on the SH-SY5Y cells: statistically significant results ($p < 0.05$) were observed at the peptide concentrations of 0 and 150 $\mu\text{g/ml}$, which was confirmed by the Kruskal-Wallis test

Результаты проведенного исследования соответствуют данным, полученным в работе [20], где показано, что нейротропный пептид Tat-NTS демонстрирует эффективность (сохраняет активность в течение 2 ч) и является нетоксичным при введении различными способами, такими как пероральный, подкожный, внутрибрюшинный и внутривенный.

На Рисунке 5 представлены данные о накоплении активных форм кислорода в клетках SH-SY5Y.

Пептидомиметик C18 способствует нормализации редокс-состояния в клетках SH-SY5Y. Так, добавление CC-18 в дозировке 100 мкг/мл сократило количество АФК на 35%, нивелировав присутствие ротенона.

Результаты исследований согласуются с данными [21], которые показали, что пептид Tat-NTS предотвращал образование АФК в нейронах, а также ингибировал ядерную транслокацию ANXA1 в микроглии, вызванную ишемическим повреждением мозга. ANXA1 оставался в цитоплазме и подвергался модификации через SUMO-окишение, после чего связывался с IKK α и NBR1. Это вызвало аутофагическую деградацию IKK α , что дополнительно подавляло путь NF- κ B и снижало высвобождение провоспалительных цитокинов IL-1 β и TNF- α в микроглии. В результате ослаблялся апоптоз нейронов и улучшалось восстановление неврологических функций после ишемии мозга.

На Рисунке 6 представлены данные об экспрессии генов редокс-маркеров GAPDH, SOD1, SOD3, NQO1 и GSS.

Пептидомиметик индуцирует элиминацию АФК и, как следствие, снижается экспрессия маркеров редокс. У генов SOD1 (супероксиддисмутаза), NQO1, GSS (глутатионсинтаза) и GAPDH (гликолитический фермент глицеральдегид-3-фосфатдегидрогеназа) достоверно снижается экспрессия на 40,83; 50,6; 35,5; 38,7 и 35,3% в сравнении с их уровнем при инкубировании с ротеноном. Данный эффект указывает на снижение количества супер-анион кислорода, гидроксогрупп и перекиси водорода как ключевых и наиболее значимых АФК. SOD1 относится к классу ферментов, которые катализируют превращение супероксидных радикалов в кислород и перекись водорода. У всех млекопитающих, включая человека, есть три изоформы супероксиддисмутазы: Cu/ZnSOD (SOD1), митохондриальная MnSOD (SOD2) и внеклеточная Cu/ZnSOD (SOD3). Нарушение их антиоксидантной функции связывают с заболеваниями с нарушением функции нервной системы и других [22,23].

В нашем эксперименте активность SOD1 при окислительном стрессе клеток снижается на фоне применения пептидомиметика CC-18, что свидетельствует об ослаблении окислительного стресса в клетках и согласуется с исследованиями [24–26], в которых доказано, что снижение экспрессии SOD1 связано с ослаблением окислительного повреждения, включая перекисное окисление липидов мембран, карбонилирование белков и разрыв ДНК.

Исследования [27] показали, что активный центр рекомбинантного цитозольного фермента NQO1 содержит нековалентно связанный флаavin в форме ФАД и способен генерировать восстановленный флаavin (ФАДН $_2$) путем окисления НАД(Ф)Н в экспериментах с очищенным ферментом и в клеточных системах, экспрессирующих NQO1. Таким образом, NQO1 функционирует как НАД(Ф)Н-зависимая супероксидредуктаза, поддерживая восстановленный флаavin. Следует отметить, что высокий уровень NQO1, наблюдаемый во многих типах клеток как до, так и после индукции в результате стрессовых реакций, может компенсировать более низкую скорость восстановления супероксида с помощью NQO1. Кроме того, по данным [28], высокий уровень экспрессии NQO1 обнаружен в тканях, подвергающихся воздействию высокого уровня кислорода, таких как роговица, хрусталик глаза, дыхательные пути и кровеносные сосуды. В клетках, чувствительных к окислительному стрессу, включая адипоциты, NQO1 обеспечивает дополнительную защиту от перекисного окисления липидов [29]. Поэтому в эксперименте мы изучили экспрессию NQO1.

В исследованиях установлено, что экспрессия NQO1 достоверно снижается на 50,6% в сравнении с уровнем при инкубировании с ротеноном. Следовательно, NQO1 может функционировать как белок, чувствительный к окислительно-восстановительным процессам, и как окислительно-восстановительный переключател. Это согласуется с исследованиями [30], в которых предполагается, что локальное соотношение пиридиновых нуклеотидов приводит к восстановлению ФАД и к изменению конформации белка. Изменение конформации приводит к потере связывания с антителами, которые нацелены на несколько участков NQO1. Это конформационное изменение обратимо и зависит от уровня восстановленных пиридиновых нуклеотидов и окислительно-восстановительного состояния

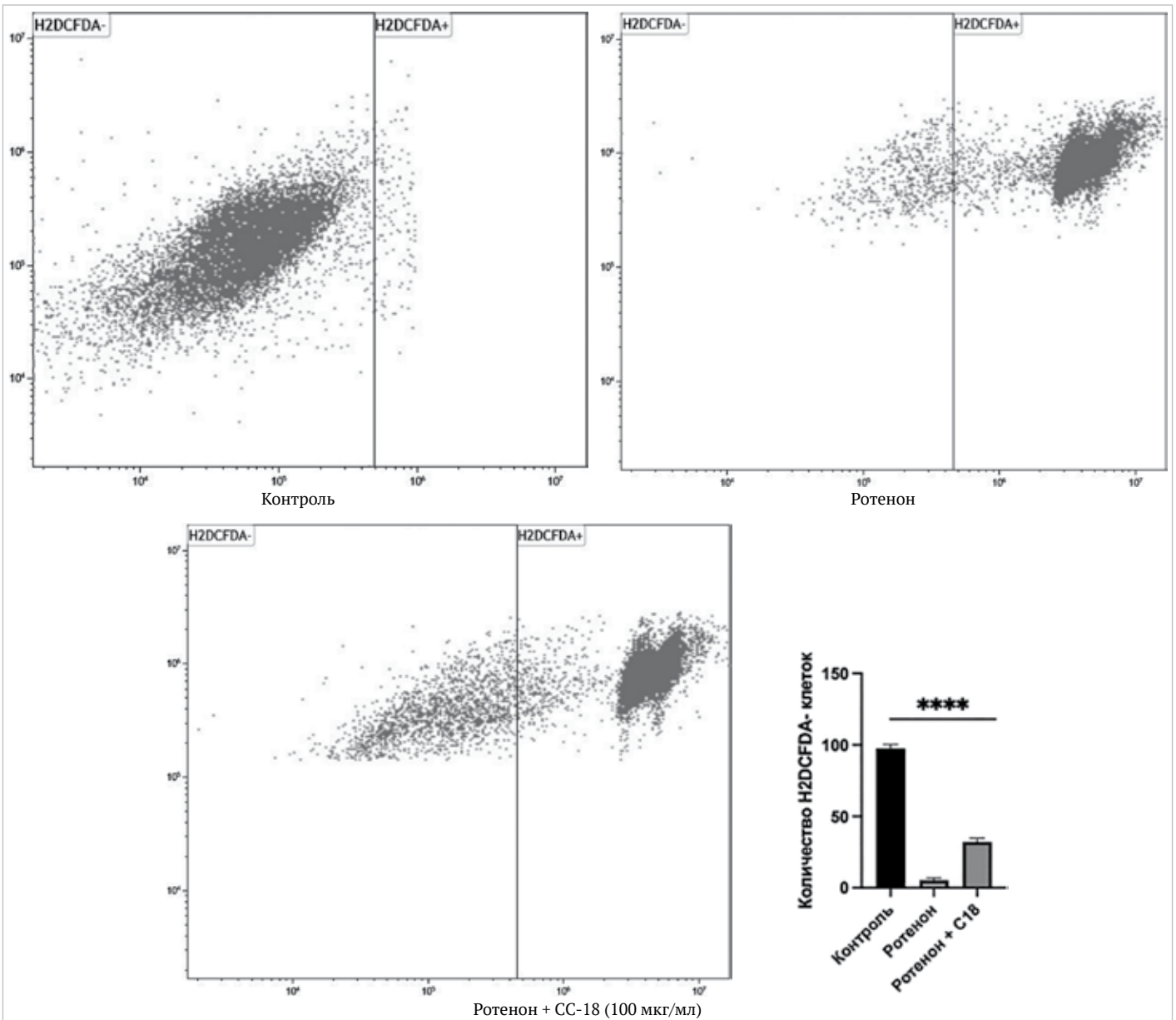


Рисунок 5. Результаты исследований по накоплению активных форм кислорода в клетках SH-SY5Y (клетки слева от разделяющей линии – без АФК, справа – с наличием АФК): значения достоверно отличались друг от друга ($p < 0,001$), что подтверждено с помощью теста Крускала-Уоллиса

Figure 5. Results of the study of the accumulation of reactive oxygen species in the SH-SY5Y cells (cells to the left of the separating line – without ROS, to the right – with ROS): values significantly differ from each other ($p < 0.001$), which was confirmed by the Kruskal-Wallis test

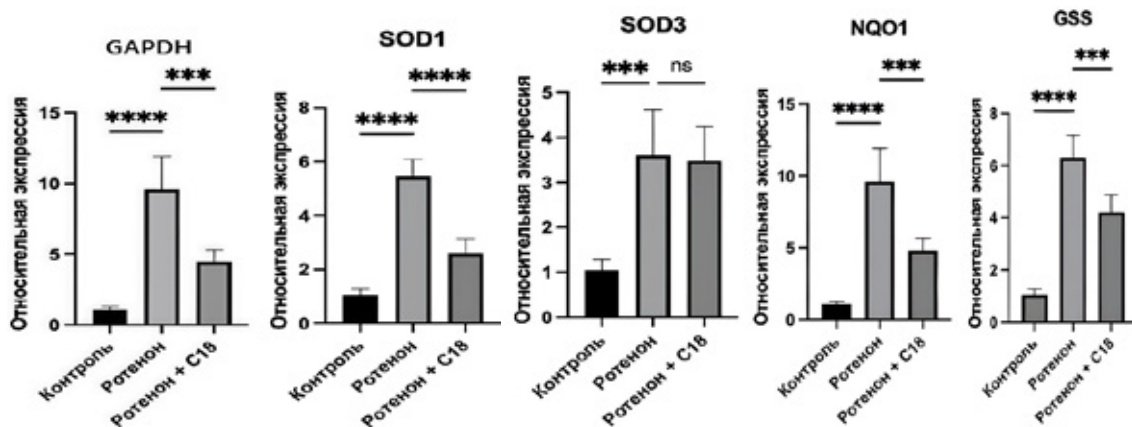


Рисунок 6. Экспрессии генов SOD1, SOD3, NQO1, GSS и GAPDH – маркеров редокс в клетках SH-SY5Y: значения достоверно отличались друг от друга (** – $p < 0,005$; **** – $p < 0,001$); ns – значения статистически незначимы. Анализ результатов был подтвержден с помощью теста Крускала-Уоллиса

Figure 6. Expression of the genes SOD1, SOD3, NQO1, GSS and GAPDH – redox markers in the SH-SY5Y cells: values significantly differ from each other (** – $p < 0.005$; **** – $p < 0.001$); ns – values are statistically non-significant. Analysis of the results was confirmed by the Kruskal-Wallis test

флавина. Защита от протеасомной деградации белков с помощью NQO1 зависела от уровня пиридиновых нуклеотидов. Это позволяет предположить, что на взаимодействие NQO1 с белками-мишенями может напрямую влиять соотношение NAD(P)H: NAD(P)⁺ и конформация белка. Поэтому NQO1 может быть потенциальным сенсором восстановленных пиридиновых нуклеотидов, который реагирует на изменения в окислительно-восстановительной среде пиридиновых нуклеотидов, изменяя свою конформацию.

Что касается биохимии окислительно-восстановительного механизма защиты NAD(P)H от окисления и протеолитического расщепления, можно предположить следующее. В нормальных условиях, когда уровень NAD(P)H высок, NQO1 принимает восстановленную конформацию после переноса гидрида от NAD(P)H к кофактору FAD в NQO1. В присутствии эффективных акцепторов электронов, таких как некоторые хиноны, восстановленная форма флавина существует очень недолго. Однако в отсутствие эффективных акцепторов электронов реакция между O₂ и восстановленным флавином протекает медленно, что свидетельствует о заметной стабильности восстановленной формы фермента в таких условиях. Рентгеновская кристаллография, биохимические и вычислительные исследования позволили предположить, что стабильность восстановленной формы NQO1 частично обусловлена стабилизацией разделения зарядов в восстановленном флавине с помощью белка [31]. Восстановленную и окисленную формы NQO1 можно различить с помощью редокс-зависимых антител, которые связываются с окисленным, но не с восстановленным NQO1 (Рисунок 7) [30].

В присутствии НАД(Ф)Н, но в отсутствие эффективного акцептора электронов в виде хинона, удалось иммунопреципитировать лишь небольшое количество NQO1, что свидетельствует о наличии восстановленной формы NQO1. По мере снижения уровня НАД(Ф)Н NQO1 больше не может поддерживать восстановленную конформацию, а присутствие окислительно-восстановительных ферментов способствует поддержанию определенных белков в окисленной форме, что необходимо для эффективного связывания с антителами при иммунопреципитации. NQO1 претерпевает конформационные изменения при связывании с восстановленными пиридиновыми нуклеотидами, что приводит к потере иммунореактивности по отношению к антителам, которые связываются с седьмой спиралью домена каталитического ядра или С-концом. Восстановленная и окисленная конформации NQO1 не были структурно охарактеризованы, но неденатурирующие гели явно демонстрируют различия в миграционных свойствах восстановленной и окисленной конформаций фермента. В исследовании [32] было продемонстрировано, что NQO1 может существовать как минимум в трех различных конформационных формах: восстановленной, окисленной и инактивированной, которые по-разному взаимодействуют с антителами и, следовательно, по-разному влияют на взаимодействие с нижестоящими белками.

В целом это подчеркивает зависимость структуры NQO1 от окислительно-восстановительных процессов и конформации, а также то,

как она может играть альтернативную роль в восприятии окислительно-восстановительных процессов и/или переключении между ними. Изменения в окислительно-восстановительном статусе пиридиновых нуклеотидов приводят к изменению конформации NQO1, что, в свою очередь, может модулировать последующие взаимодействия NQO1. Вопрос о том, приводят ли конформационные изменения в NQO1 к изменению расположения белка, остается открытым и требует дальнейшего изучения. Известно, что NQO1 в основном находится в цитозоле, но, по некоторым данным, в разных типах клеток он также присутствует в значительных количествах в ядре, митохондриях и мембранах [3,15,33].

Тот факт, что соотношение пиридиновых нуклеотидов определяет конформацию NQO1, о чем свидетельствует связывание редокс-специфичных антител, позволяет предположить, что NQO1 также может служить редокс-датчиком, как и другие флавопротеины. Изменение функциональности NQO1, особенно в отношении взаимодействия с другими белками и РНК, в зависимости от окислительно-восстановительного состояния пиридиновых нуклеотидов, открывает интересные возможности для передачи сигналов, зависящих от окислительно-восстановительных процессов. Следовательно, экспрессия NQO1 при индуцированном редокс-состоянии отражает жизнеспособность клеток SH-SY5Y. Это указывает на нейропротекторное действие пептидомиметика в эксперименте.

В эксперименте нами рассмотрена экспрессия глутатионсинтазы (GSS). В присутствии GSS из глутамата, цистеина и глицина вырабатывается глутатион (GSH), участвующий в антиоксидантной системе и способный защищать клетки от повреждения липидными пероксидами. С помощью глутатиона поддерживается окислительно-восстановительный баланс в клетке и в организме в целом. Снижение активности GSS приводит к ослаблению антиоксидантной защиты, накоплению липидных пероксидов и запуску ферроптоза — типа гибели клеток. Под действием глутатиона ферроптоз подавляется, поскольку липидные пероксиды превращаются в соответствующие спирты. Таким образом, истощение запасов глутатиона является основной причиной запуска ферроптоза [34–36].

По данным [37,38], ингибирование GSS приводит к нарушению синтеза GSH, который является необходимым кофактором для глутатионпероксидазы (GPX2). Нарушение синтеза GSH ослабляет активность GPX2, что, в свою очередь, приводит к выработке липидных АФК и ферроптозу [39].

В исследовании [40] установлено, что подавление GPX2 делает эпителиальные клетки лёгких чувствительными к окислительному повреждению. Повышение уровня GPX2 ослабляет апоптотическую реакцию клеток MCF7 на окислительный стресс.

В результате исследований установлено, что на фоне использования пептидомиметика экспрессия GSS была выше, чем в контроле, на 307%, но ниже, чем при инкубировании с ротеноном, на 35,4%. Это свидетельствует о нивелировании окислительного действия ротенона на клетку и, соответственно, о предупреждении гибели

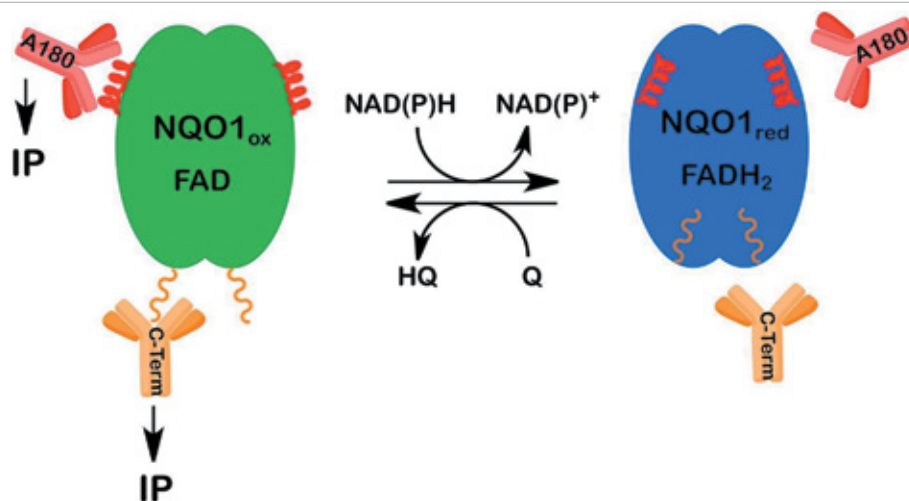


Рисунок 7. Схематическое изображение редокс-зависимой иммунореактивности NQO1. Когда НАД(Ф)Н легко доступен, NQO1 принимает восстановленную конформацию (синяя), что препятствует связыванию антител с редокс-зависимыми эпитопами в спирали 7 (A180) и с С-концевыми хвостами. Когда уровень НАД(Ф)Н падает, фермент не может поддерживать восстановленную конформацию, и редокс-зависимые эпитопы становятся доступными для иммунопреципитации (IP) [30]

Figure 7. Schematic illustration of the redox-dependent immunoreactivity of NQO1. When NAD(P)H is easily available, NQO1 adopts the reduced conformation (blue), which prevents binding antibodies to redox-dependent epitopes within helix 7 (A180) and to the C-terminal tails. When the NAD(P)H levels decrease, the enzyme is not able to maintain the reduced conformation and redox-dependent epitopes become available for immunoprecipitation (IP) [30]

нейробластом от АФК. Следовательно, пептидомиметик СС-18 участвует в регуляции окислительно-восстановительных реакций. Данное исследование показало, что СС-18, вероятно, может напрямую взаимодействовать как с глутатионсинтегазой, так и с GPX2. Можно предположить, что и глутатионсинтегаза является потенциальной мишенью пептидомиметика СС-18.

В присутствии НАД(Ф)Н, но также в отсутствие эффективного акцептора электронов в виде хинона удалось иммунопреципитировать лишь небольшое количество NQO1, что свидетельствует о наличии восстановленной формы NQO1. Отдельные восстановленная и окисленная конформации NQO1 не были структурно охарактеризованы, но не денатурирующие гели явно демонстрируют различия в миграционных свойствах восстановленной и окисленной конформаций фермента [32]. В последующих исследованиях [33] было продемонстрировано, что NQO1 может существовать как минимум в трех различных конформационных формах: восстановленной, окисленной и инактивированной, которые по-разному взаимодействуют с антителами и, следовательно, по-разному влияют на взаимодействие с нижестоящими белками.

Исследование на гликолитическом ферменте GAPDH является особенно интересным, так как по нему можно судить об окислительно-восстановительных свойствах белка. Во-первых, GAPDH по своей природе более реактивен по отношению к H_2O_2 , чем большинство других редокс-регулируемых белков. Также GAPDH гораздо более распространен, чем большинство других белков, регулируемых окислительно-восстановительными процессами. Цитозольная концентрация тетрамерного GAPDH оценивается в ~ 240 мкМ, что означает, что цитозольная концентрация тиолов активного центра GAPDH составляет почти 1 мМ. Такое сочетание повышенной тиоловой реактивности и высокой концентрации теоретически делает GAPDH наиболее значимым белком-мишенью для ротенона, помимо специализированных тиоловых пероксидаз, и позволяет предположить, что GAPDH должен эффективно конкурировать за ротенон [41]. Учитывая цитозольную распространенность, GAPDH является наиболее значимой мишенью H_2O_2 в клетке, помимо специализированных тиолпероксидаз, поэтому мы исследовали его изменение в нашем эксперименте. В исследованиях авторов [42] экспериментально было установлено, что GAPDH является наиболее значимой пероксидазной мишенью для окислителей внутри клеток. Научно обосновано, почему GAPDH обладает исключительной реакционной способностью по отношению к H_2O_2 . В GAPDH тиолат C152 — аминокислотный остаток цистеина — является реактивным нуклеофилом активного центра. Кроме того, хорошо известно, что GAPDH чувствителен к окислительной инактивации из-за прямой реакции тиолата C152 с H_2O_2 , в результате которой образуется сульфеновая кислота и последующие продукты окисления. Доказано, что реакция между C152 в активном центре белка и H_2O_2 катализируется ранее неизвестным, высококонсервативным и специализированным механизмом, который, подобно механизму, используемому тиолпероксидазами, стабилизирует специфическое переходное состояние реакции и способствует отщеплению уходящей группы, обеспечивая специализированный путь переноса протонов. Примечательно, что этот механизм влияет только на реакционную способность C152 по отношению к H_2O_2 , не затрагивая реакционную способность по отношению к гликолитическому субстрату глицеральдегид-3-фосфату (G3P). Таким образом, реакционная способность C152 по отношению к H_2O_2 и G3P регулируется отдельными механизмами, которые не связаны друг с другом. Эти результаты противоречат ранее существовавшим представлениям о тиолах, которые в целом являются реакционноспособными или нереакционноспособными, и, таким образом, позволяют лучше понимать процесс окисления тиолов в белках.

По данным [43], GAPDH легко окисляется в своем активном центре цистеином в ответ на умеренное повышение уровня внутриклеточного пероксида водорода (H_2O_2). Ни один другой фермент не окисляется H_2O_2 [44]. GAPDH отличается от других тиолсодержащих белков тем, что реакционная способность H_2O_2 по отношению к тиолу его активного центра выше, чем у белковых тиолов в целом [42]. Окисление тиола GAPDH сначала приводит к сульфенированию ($R-SH + H_2O_2 \rightarrow R-SOH + H_2O$), а затем к глутатионированию ($R-SOH + GSH \rightarrow R-SSG + H_2O$). В результате происходит обратное ингибирование гликолитической активности GAPDH [43].

Следует отметить, что GAPDH обладает «встроенным» каталитическим механизмом, который значительно повышает скорость реакции между H_2O_2 и тиолом в активном центре. Этот механизм объясняет, почему кажущаяся константа скорости второго порядка для окисления GAPDH при pH 7 значительно выше, чем для других белков, регулируемых окислительно-восстановительными процессами.

Предлагаемый механизм, специфичный для H_2O_2 , основан на стабилизации переходного состояния и на содействии отщеплению группы, подобно каталитическим принципам, применяемым к специализированным тиолпероксидазам. В частности, повышенная чувствительность GAPDH к H_2O_2 зависит от протонного реле, которое позволяет отщепляющемуся гидроксильному иону превращаться в молекулу воды. Одна из причин, по-видимому, заключается в том, что участок, способствующий окислению в GAPDH, не виден при изучении кристаллической структуры. Остатки, участвующие в реакции с H_2O_2 , структурно незаметны, поскольку не образуют собственной полости активного центра. Участок реакции с H_2O_2 представляет собой неглубокую вогнутость на внутренней поверхности канонического активного центра, а цепь передачи протонов в основном скрыта внутри белка и взаимодействует с полостью активного центра только через один остаток (T153). Следует отметить, что гликолитическую и пероксидазную активность GAPDH можно полностью отделить друг от друга несмотря на то, что обе активности зависят от одного и того же нуклеофильного тиола. Предполагается, что тиол в целом «активирован», и поэтому нет необходимости в отдельном механизме окисления тиола. Почти исключительное внимание к нуклеофильным свойствам, возможно, также способствовало распространению мнения о том, что значения pK_a тиолов являются ключевыми факторами, определяющими их реакционную способность по отношению к H_2O_2 . Однако в рамках концепции, ориентированной на нуклеофилы и pK_a , практически невозможно найти мутаций, которые избирательно устраняют чувствительность к окислению, сохраняя при этом каноническую каталитическую функцию, или наоборот.

Противоречие легко устраняется, если признать, что продуктивное окисление тиолов H_2O_2 требует завершения всего реакционного пути, на котором возникают кинетические барьеры, не связанные с иницирующей нуклеофильной атакой. Таким образом, для существенного повышения скорости реакции с H_2O_2 требуются каталитические механизмы, воздействующие на переходное состояние и уходящую группу. Действительно, разделение пероксидазной и гликолитической реактивности в наших экспериментах было достигнуто за счет прерывания функций, повышающих скорость реакции. Эти функции способствуют протеканию последующих стадий реакции и не связаны с иницирующей нуклеофильной атакой. Тот факт, что гликолитическую и пероксидазную реакции можно разделить, не противоречит тому, что нуклеофильность C152 является общим условием как для гликолитической, так и для пероксидазной реакций.

Специфическая чувствительность GAPDH к H_2O_2 в сочетании с его высокой концентрацией в цитозоле подтверждает идею о том, что GAPDH действует как датчик H_2O_2 в условиях длительного воздействия H_2O_2 . Сначала системы тиолпероксидаз поддерживают низкий уровень H_2O_2 , но их постоянная активность приводит к истощению запасов NADPH, что, в свою очередь, замедляет поглощение H_2O_2 . Возникающее в результате повышение внутриклеточной стационарной концентрации H_2O_2 приводит к S-сульфенированию GAPDH, за которым быстро следует S-глутатионирование. Примечательно, что восстановительная реактивность S-глутатионированного GAPDH зависит от NADPH-зависимых восстановительных систем. Таким образом, S-глутатионирование сохраняет GAPDH в неактивном состоянии до тех пор, пока уровень NADPH не восстановится до уровня, позволяющего реактивировать GAPDH. Это, скорее всего, создает петлю обратной связи для саморегуляции. Таким образом, GAPDH может действовать как «защитник второй линии» после тиолпероксидаз, усиливая выработку НАДФН. Это обеспечивает поддержку НАДФН-зависимых «защитников первой линии» в их антиоксидантной функции. Реактивность GAPDH в отношении H_2O_2 может быть точно настроена таким образом, чтобы реагировать на небольшое повышение общего уровня H_2O_2 .

Приведенные выше результаты позволяют предположить, что клетки SH-SY5Y с низкой экспрессией GAPDH лучше поддерживают уровень НАДФН в условиях окислительного стресса при включении СС-18 по сравнению с клетками, где в эксперименте не был использован исследуемый пептид. Полученные данные согласуются с исследованиями [45], в которых доказано, что клетки с низкой экспрессией GAPDH способны поддерживать уровень НАДФН при воздействии H_2O_2 .

Пептидомиметик СС-18 был получен в результате молекулярной пептидной трансплантации аминокислотных последовательностей в циклический пептид из базы данных циклических пептидов Cybase с номером [Nphe5]SFTI-1(100). Такая стратегия гибридизации позволила комбинировать функциональные фрагменты двух различных пептидов для создания гибридного пептидомиметика с заданной

направленностью и устойчивого к протеолизу. Этот подход сегодня применяется в различных исследованиях благодаря своей простоте и эффективности [44,45]. При разработке пептидомиметиков еще одной важной задачей является выявление функциональных пептидных фрагментов в больших библиотеках пептидных последовательностей. Благодаря стремительному развитию компьютерных технологий, виртуальный скрининг на основе вычислений сделал возможным высокопроизводительный скрининг функциональных пептидомиметиков. Молекулярный докинг, проведенный в нашем исследовании, подтвердил эффективность выявления пептидных последовательностей с высокой антиоксидантной активностью и аффинностью к целевым белкам. Эти результаты, возможно, позволят значительно сократить трудозатраты при отборе потенциально перспективных пептидов. Результаты исследований подтверждают, что с помощью программных инструментов для докинга белков и пептидов можно получить пептидомиметики с заданными свойствами и биологической направленностью. Следует отметить, что у каждого программного обеспечения для докинга есть свои алгоритмические предпочтения, которые могут влиять на производительность в зависимости от конкретной задачи. Это особенно важно для быстрого скрининга при разработке пептидомиметиков и молекулярном

проектировании. Но не следует останавливаться только на молекулярном докинге при разработке новых пептидомиметиков. Следует активно применять и продвигать модели клеточного скрининга с использованием репортерных генов, поскольку они значительно повышают эффективность скрининга и, в отличие от виртуального скрининга, пригодны для разработки пептидомиметиков. Такие клеточные анализы обеспечивают выявление всех потенциальных биоактивных мишеней без риска их упущения. Кроме того, результаты клеточных анализов более убедительны и надежны.

4. Выводы

Синтезированный циклический пептидомиметик CC-18 обладает нейропротекторными свойствами благодаря активации экспрессии генов, регулирующих реакцию на окислительный стресс. Это способствует элиминации АФК в клетках. Следовательно, можно предположить, что CC-18 регулирует экспрессию генов SOD1, SOD3, NQO1, GSS и GAPDH — маркеров редокс-состояния в нервных клетках. Представленный комплекс исследований подтверждает гипотезу о положительной роли пептидомиметиков в предупреждении развития неврологических заболеваний, вызванных окислительным стрессом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Hu, Y.-M., Lu, S.-Z., Li, Y.-S., Wang, H., Shi, Y., Zhang, L. et al. (2022). Protective effect of antioxidant peptidomimetics from grass carp scale gelatin on the H₂O₂ — mediated oxidative injured HepG2 cells. *Food Chemistry*, 373(Part B), Article 131539. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131539>
- Zheng, L., Xu, H., Hu, H., Ruan, J., Shi, C., Cao, J. et al. (2022). Preparation, characterization, and antioxidant activity of inclusion complex loaded with puerarin and corn peptidomimetic. *Food Bioscience*, 49, Article 101886. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101886>
- Ruan, J., Chen, J., Zeng, J., Yang, Z., Wang, C., Hong, Z. et al. (2019). The protective effects of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) scale collagen hydrolysate against oxidative stress induced by tributyltin in HepG2 cells. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(4), 3612–3620. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3729-9>
- Tsang, A. H., Chung, K. K. (2009). Oxidative and nitrosative stress in Parkinson's disease. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Molecular Basis of Disease*, 1792(7), 643–650. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2008.12.006>
- Borges, T., Coelho, P., Prudêncio, C., Gomes, A., Gomes, P., Ferraz, R. (2025). Bioactive peptides from milk proteins with antioxidant, anti-inflammatory, and antihypertensive activities. *Foods*, 14(3), Article 535. <https://doi.org/10.3390/foods14030535>
- Senek, M., Nyholm, D. (2014). Continuous drug delivery in Parkinson's disease. *CNS Drugs*, 28(1), 19–27. <https://doi.org/10.1007/s40263-013-0127-1>
- Li, M., Zheng, H., Lin, M., Zhu, W., Zhang, J. (2020). Characterization of the protein and peptidomimetic of excipient zein by the multienzyme digestion coupled with nano-LC-MS/MS. *Food Chemistry*, 321, Article 126712. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126712>
- Duffuler, P., Bhullar, K. S., de Campos Zani, S. C., Wu, J. (2022). Bioactive peptides: From basic research to clinical trials and commercialization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(12), 3585–3595. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06289>
- Majura, J. J., Cao, W., Chen, Z., Htwe, K. K., Li, W., Du, R. et al. (2022). The current research status and strategies employed to modify food-derived bioactive peptides. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 950823. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.950823>
- Murtaza, M. A., Irfan, S., Hafiz, I., Ranjha, M., Rahaman, A., Murtaza, M. et al. (2022). Conventional and novel technologies in the production of dairy bioactive peptides. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 780151. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.780151>
- Wang, W., Yang, W., Dai, Y., Liu, J. H., Chen, Z.-Y. (2023). Production of food-derived bioactive peptides with potential application in the management of diabetes and obesity: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(15), 5917–5945. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c08835>
- DFBP (Database of food-derived bioactive peptides) Retrieved from <http://www.cqudfbp.net/index.jsp> Accessed October 01, 2025.
- Улитина, Е. А., Валиева, Ш. С., Тихонов, С. Л., Тихонова, Н. В. (2024). Новый антимикробный пищевой пептид: характеристика, свойства и оценка эффективности. *Аграрная наука*, 4, 132–137. [Ulitina, E. A., Valieva, Sh. S., Tikhonov, S. L., Tikhonova, N. V. (2024). A new antimicrobial food peptide: Characteristics, properties and effectiveness evaluation. *Agrarian Science*, 4, 132–137. (In Russian)] <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-581-4-132-137>
- Zizzari, A. T., Pliatsika, D., Gall, F. M., Fischer, T., Riedl, R. (2021). New perspectives in oral peptidomimetic delivery. *Drug Discovery Today*, 26(4), 1097–1105. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2021.01.020>
- Wang, C. K., Craik, D. J. (2021). Linking molecular evolution to molecular grafting. *Journal of Biological Chemistry*, 296, Article 100425. <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2021.100425>
- Qin, L., Cui, Z., Wu, Y., Wang, H., Zhang, X., Guan, J. et al. (2022). Challenges and strategies to enhance the systemic absorption of inhaled peptidomimetics and proteins. *Pharmaceutical Research*, 40(5), 1057–1055. <https://doi.org/10.1007/s11095-022-05435-3>
- Tanada, M., Tamiya, M., Matsuo, A., Chiyoda, A., Takano, K., Ito, T. et al. (2023). Development of orally bioavailable peptidomimetics targeting an intracellular protein: From a hit to a clinical KRAS inhibitor. *Journal of the American Chemical Society*, 145(30), 16610–16620. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c05886>
- Qureshi, S., Galiveeti, S., Bichet, D. G. (2014). Diabetes insipidus: Celebrating a century of vasopressin therapy. *Endocrinology*, 155(12), 4605–4621. <https://doi.org/10.1210/en.2014-1385>
- Nielsen, D. S., Shepherd, N. E., Xu, W., Lucke, A. J., Stoermer, M. J., Fairlie, D. P. (2017). Orally absorbed cyclic peptidomimetics. *Chemical Reviews*, 117(12), 8094–8128. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00838>
- Zhao, Z., Li, F., Ning, J., Peng, R., Shang, J., Liu, H. et al. (2021). Novel compound FLZ alleviates rotenone-induced PD mouse model by suppressing TLR4/MyD88/NF-κB pathway through microbiota-gut-brain axis. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 11(9), 2859–2879. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2021.03.020>
- Zhou, H., Yan, L., Huang, H., Li, X., Xia, Q., Zheng, L. et al. (2023). Tat-NTS peptidomimetic protects neurons against cerebral ischemia-reperfusion injury via ANXA1 SUMOylation in microglia. *Theranostics*, 13(15), 5561–5581. <https://doi.org/10.7150/tno.85390>
- Zhao, J.-S., Jin, H.-X., Gao, J.-L., Pu, C., Zhang, P., Huang, J.-J. et al. (2018). Serum extracellular superoxide dismutase is associated with diabetic retinopathy stage in Chinese patients with type 2 diabetes mellitus. *Disease Markers*, 2018, Article 8721379. <https://doi.org/10.1155/2018/8721379>
- Trist, B. G., Davies, K. M., Cottam, V., Genoud, S., Ortega, R., Roudeau, S. et al. (2017). Amyotrophic lateral sclerosis-like superoxide dismutase 1 proteinopathy is associated with neuronal loss in Parkinson's disease brain. *Acta Neuropathologica*, 134(1), 113–127. <https://doi.org/10.1007/s00401-017-1726-6>
- Van Remmen, H., Hamilton, M. L., Richardson, A. (2003). Oxidative damage to DNA and aging. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 31(5), 149–153. <https://doi.org/10.1097/00003677-200307000-00009>
- Elchuri, S., Oberley, T. D., Qi, W., Eisenstein, R. S., Roberts, L. J., Van Remmen, H. et al. (2005). CuZnSOD deficiency leads to persistent and widespread oxidative damage and hepatocarcinogenesis later in life. *Oncogene*, 24(3), 367–380. <https://doi.org/10.1038/sj.onc.1208207>
- Yang, W., Li, J., Hekimi, S. (2007). A measurable increase in oxidative damage due to reduction in superoxide detoxification fails to shorten the life span of long-lived mitochondrial mutants of *Caenorhabditis elegans*. *Genetics*, 177(4), 2065–2074. <https://doi.org/10.1534/genetics.107.080788>
- Zhu, H., Jia, Z., Mahaney, J. E., Ross, D., Misra, H. P., Trush, M. A. et al. (2007). The highly expressed and inducible endogenous NAD(P)H: Quinone oxidoreductase 1 in cardiovascular cells acts as a potential superoxide scavenger. *Cardiovascular Toxicology*, 7(3), 202–211. <https://doi.org/10.1007/s12012-007-9001-z>
- Siegel, D., Ross, D. (2000). Immunodetection of NAD(P)H: Quinone oxidoreductase 1 (NQO1) in human tissues. *Free Radical Biology and Medicine*, 29(3–4), 246–253. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(00\)00310-5](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(00)00310-5)
- Palming, J., Sjöholm, K., Jernäs, M., Lystig, T. C., Gummesson, A., Romeo, S. et al. (2007). The expression of NAD(P)H: quinone oxidoreductase 1 is high in human adipose tissue, reduced by weight loss, and correlates with adiposity, insulin sensitivity, and markers of liver dysfunction. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 92(6), 2346–2352. <https://doi.org/10.1210/jc.2006-2476>
- Siegel, D., Dehn, D. D., Bokatzian, S. S., Quinn, K., Backos, D. S., Di Francesco, A. et al. (2018). Redox modulation of NQO1. *PLoS One*, 13(1), Article e0190717. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190717>
- Janke, C., Montagnac, G. (2017). Causes and consequences of microtubule acetylation. *Current Biology*, 27(23), R1287–R1292. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.10.044>
- Siegel, D., Bersie, S., Harris, P., Di Francesco, A., Armstrong, M., Reisdorff, N. et al. (2021). A redox-mediated conformational change in NQO1 controls binding to microtubules and α-tubulin acetylation. *Redox Biology*, 39, Article 101840. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101840>
- Milkovic, L., Tomljanovic, M., Gasparovic, A.C., Kujundzic, R.N., Simunic, D., Konjevoda, P. et al. (2019). Nutritional stress in head and neck cancer originating cell lines: The sensitivity of the NRF2-NQO1 axis. *Cells*, 8(9), Article 1001. <https://doi.org/10.3390/cells8091001>

34. Yang, W. S., SriRamaratnam, R., Welsch, M. E., Shimada, K., Skouta, R., Viswanathan, V. S. et al. (2014). Regulation of ferroptotic cancer cell death by GPX4. *Cell*, 156(1–2), 317–331. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2013.12.010>
35. Yang, Y., Lin, J., Guo, S., Xue, X., Wang, Y., Qiu, S. et al. (2020). RRM2 protects against ferroptosis and is a tumor biomarker for liver cancer. *Cancer Cell International*, 20(1), Article 587. <https://doi.org/10.1186/s12935-020-01689-8>
36. Tang, H., Chen, D., Li, C., Zheng, C., Wu, X., Zhang, Y. et al. (2019). Dual GSH-exhausting sorafenib loaded manganese-silica nanodrugs for inducing the ferroptosis of hepatocellular carcinoma cells. *International Journal of Pharmaceutics*, 572, Article 118782. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.118782>
37. Yang, W. S., Stockwell, B. R. (2016). Ferroptosis: Death by lipid peroxidation. *Trends in Cell Biology*, 26(3), 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.tcb.2015.10.014>
38. Mao, L., Zhao, T., Song, Y., Lin, L., Fan, X., Cui, B. et al. (2020). The emerging role of ferroptosis in non-cancer liver diseases: Hype or increasing hope? *Cell Death and Disease*, 11(7), Article 518. <https://doi.org/10.1038/s41419-020-2732-5>
39. Lewerenz, J., Hewett, S. J., Huang, Y., Lambros, M., Gout, P. W., Kalivas, P. W. et al. (2013). The cystine/glutamate antiporter system x(c) (–) in health and disease: From molecular mechanisms to novel therapeutic opportunities. *Antioxidants and Redox Signaling*, 18(5), 522–555. <https://doi.org/10.1089/ars.2011.4391>
40. Singh, A., Rangasamy, T., Thimmulappa, R. K., Lee, H., Osburn, W. O., Brigelius-Flohé, R. et al. (2006). Glutathione peroxidase 2, the major cigarette smoke-inducible isoform of GPX in lungs, is regulated by Nrf2. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 35(6), 639–650. <https://doi.org/10.1165/rcmb.2005-0325OC>
41. Seidler, N. W. (2013). GAPDH: Biological properties and diversity. Springer Dordrecht, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4716-6>
42. Peralta, D., Bronowska, A. K., Morgan, B., Dóka, É., Van Laer, K., Nagy, P. et al. (2015). A proton relay enhances H₂O₂ sensitivity of GAPDH to facilitate metabolic adaptation. *Nature Chemical Biology*, 11(2), 156–163. <https://doi.org/10.1038/nchembio.1720>
43. Van der Reest, J., Lilla, S., Zheng, L., Zanivan, S., Gottlieb, E. (2018). Proteome-wide analysis of cysteine oxidation reveals metabolic sensitivity to redox stress. *Nature Communications*, 9(1), Article 1581. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04003-3>
44. Anastasiou, D., Pouligiannis, G., Asara, J. M., Boxer, M. B., Jiang, J.-K., Shen, M. et al. (2011). Inhibition of pyruvate kinase M2 by reactive oxygen species contributes to cellular antioxidant responses. *Science*, 334(6060), 1278–1283. <https://doi.org/10.1126/science.1211485>
45. Talwar, D., Miller, C. G., Grossmann, J., Szyrwił, L., Schwecke, T., Demichev, V. et al. (2023). The GAPDH redox switch safeguards reductive capacity and enables survival of stressed tumour cells. *Nature Metabolism*, 5(4), 660–676. <https://doi.org/10.1038/s42255-023-00781-3>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Бабич Ольга Олеговна — доктор технических наук, директор, Научно-образовательный центр «Промышленные биотехнологии», Балтийский федеральный университет имени И. Канта. 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14 E-mail: olich.43@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4921-8997	Olga O. Babich , Doctor of Technical Sciences, Director, Scientific and Educational Center "Industrial Biotechnologies", Immanuel Kant Baltic Federal University 14, A. Nevsky str., 236041, Kaliningrad, Russia E-mail: olich.43@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4921-8997
Тихонов Сергей Леонидович — доктор технических наук, профессор, Заведующий кафедрой «Высшая школа биотехнологии», Уральский государственный лесотехнический университет 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37 E-mail: tihonov75@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4863-9834 * автор для контактов	Sergey L. Tikhonov , Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher School of Biotechnology, Ural State Forestry University 37, Sibirskiy Trakt, 620100, Yekaterinburg, Russia E-mail: tihonov75@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4863-9834 * corresponding author
Чернуха Ирина Михайловна — доктор технических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, Руководитель Отдела координации инициативных и международных проектов, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: i.chernuha@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4298-0927	Irina M. Chernukha , Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Principal Research Fellow, Head of the Department for Coordination of Initiative and International Projects, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: i.chernuha@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4298-0927
Сухих Станислав Алексеевич — доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией микробиологии и биотехнологий, Балтийский федеральный университет имени И. Канта 236001, Калининград, ул. Университетская, 2 E-mail: SSukhikh@kantiana.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7910-8388	Stanislav A. Sukhov , Doctor of Technical Sciences, Docent, Head of the Laboratory of Microbiology and Biotechnology, Immanuel Kant Baltic Federal University 2, Universitetskaya str., 236001, Kaliningrad, Russia E-mail: SSukhikh@kantiana.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7910-8388
Тихонова Наталья Валерьевна — доктор технических наук, заведующий кафедрой пищевой инженерии аграрного производства, Уральский государственный аграрный университет 620000, Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42 E-mail: tihonov75@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5841-1791	Natalia V. Tikhonova , Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Food Engineering of Agricultural Production, Ural State Agricultural University 42, Karl Liebknecht str., 620000, Yekaterinburg, Russia E-mail: tihonov75@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5841-1791
Сысуев Евгений Борисович — кандидат фармацевтических наук, доцент, руководитель филиала «Всероссийский научно-исследовательский и испытательный институт медицинской техники» Федеральной службы по надзору в сфере здравоохранения в г. Екатеринбург E-mail: es555@yandex.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7648-0088	Sysoev E. Borisovich — Candidate of Pharmaceutical Sciences, Docent, Head of the branch of the Russian Scientific and Research Institute for Medical Engineering of the Federal Service for Surveillance of Healthcare in Yekaterinburg E-mail: es555@yandex.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7648-0088
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-14-24>



Received 22.07.2025

Accepted in revised 20.01.2026

Accepted for publication 26.01.2026

© Falih M. A., Alkaisy O. H., Altemimi A. B., Abedelmaksoud T. G., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

TRACKING SHELF-LIFE DETERMINANTS IN SOFT, SEMI-HARD, AND HARD CHEESES: A QUALITY PERSPECTIVE

Mohammed A. Falih¹, Qausar Hamed Alkaisy¹, Ammar B. Altemimi^{2,*}, Tarek Gamal Abedelmaksoud^{3*}

¹Department of Dairy Science and Technology, College of Food Sciences, University of AL-Qasim Green, Al Qasim, Iraq

²Department of Food Science, College of Agriculture, University of Basrah, Basrah, Iraq

³Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt

KEYWORDS:

cheese quality, HMF, antioxidant activity, microbial safety, storage

ABSTRACT

This study evaluates the physicochemical and microbiological quality indicators of 81 cheese samples (soft, semi-hard, and hard) produced in Iran, Saudi Arabia, and Turkey and marketed in Iraq. Samples were analyzed over storage periods of up to 60 days at 4 °C. Hydroxymethylfurfural (HMF) was quantified using HPLC-DAD, while total viable counts, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and yeasts/molds were determined by plate count methods. Antioxidant activity and reducing power of water-soluble extracts were assessed using DPPH and ferric reducing assays, respectively. Results showed a wide range of HMF content, with higher values generally observed in semi-hard and hard cheeses. Microbial analysis revealed that soft cheeses had the highest total viable counts and yeast/mold counts, though all values were within permissible limits except for some *E. coli* occurrences. Antioxidant activity and reducing power were highest in hard cheeses, particularly those from Turkey. Storage time significantly influenced moisture content and peroxide values across all cheese types. This study highlights considerable variability in cheese quality across origins and types. Findings support the need for routine quality control and stricter storage guidelines to ensure consumer safety.

Поступила 22.07.2025

Поступила после рецензирования 20.01.2026

Принята в печать 26.01.2026

© Фалих М. А., Алкаиси К. Х., Альтемими А. Б., Абедельмаксуд Т. Г., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ОТСЛЕЖИВАНИЕ ДЕТЕРМИНАНТОВ СРОКА ГОДНОСТИ В МЯГКИХ, ПОЛУТВЕРДЫХ И ТВЕРДЫХ СЫРАХ: АСПЕКТ КАЧЕСТВА

Фалих М. А.¹, Алкаиси К. Х.¹, Альтемими А. Б.^{2,*}, Абедельмаксуд Т. Г.^{3,*}

¹Факультет науки и технологии молока, Колледж пищевых наук, Университет Аль-Касим Грин, Аль-Касим, Ирак

²Кафедра пищевых наук, Сельскохозяйственный колледж, Университет Басры, Басра, Ирак

³Кафедра пищевых наук, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

качество сыра, ГМФ, антиоксидантная активность, микробиологическая безопасность, хранение

В данном исследовании осуществлена оценка физико-химических и микробиологических показателей качества 81 образца сыра (мягкого, полутвердого и твердого), произведенного в Иране, Саудовской Аравии и Турции, и реализуемого в Ираке. Образцы анализировали в процессе хранения до 60 дней при 4 °C. Проведена количественная оценка гидроксиметилфурфура (ГМФ) методом ВЭЖХ с использованием детектора на диодной матрице; общее микробное число, количество *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* и дрожжей/плесеней определяли с использованием метода подсчета колониеобразующих единиц. Антиоксидантную активность и восстановительную способность оценивали с использованием метода на основе DPPH и анализа восстановления железа, соответственно. Результаты показали широкий диапазон содержания ГМФ с более высокими уровнями, обнаруженными в полутвердых и твердых сырах. Микробиологический анализ показал, что мягкие сыры имели наиболее высокие значения общего микробного числа и дрожжей/плесеней, но оставались в рамках допустимых пределов за исключением нескольких случаев обнаружения *E. coli*. Антиоксидантная активность и восстановительная способность были наибольшими в твердых сырах, особенно в сырах из Турции. Продолжительность хранения оказывала значимое влияние на содержание влаги и пероксидное число во всех видах сыра. Данное исследование подчеркивает существенную вариабельность в качестве образцов сыра в зависимости от их происхождения и вида. Результаты подтверждают необходимость регулярного контроля качества и более строгих руководств по хранению для обеспечения безопасности потребителей.

1. Introduction

Cheese is a widely consumed dairy product that provides essential nutrients, including proteins, fats, vitamins, and minerals, as well as a diverse range of bioactive compounds with potential health-promoting properties. The chemical composition, microbial safety, and antioxidant capacity of cheese vary significantly by type (soft, semi-hard, or hard), manufacturing conditions, and storage practices. As cheese is a perishable product, quality deterioration during storage, particularly under refrigeration, can compromise consumer safety and product shelf-life. Therefore, understanding the physicochemical and microbiological changes that occur during cheese storage is critical for ensuring quality and consumer health. One of the interesting compounds that form during heat treatment or storage of dairy products is 5-hydroxymethylfurfural (HMF). HMF is a marker of heat-induced reactions, particularly the Maillard reaction and sugar dehydration, and its accumulation is associated with potential health risks, including genotoxicity and mutagenicity [1,2]. Although HMF is regulated in products such as honey and fruit juice, its presence in cheese is less studied and not yet legislatively controlled, despite evidence that heat treatment and prolonged storage can elevate HMF concentrations [1].

Equally important is the microbial quality of cheese. Cheese can harbor various microorganisms, including spoilage bacteria and food-borne pathogens such as *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and, in rare cases, *Salmonella*. These contaminants may originate from raw milk, unhygienic processing, or post-processing contamination [3,4]. While certain microorganisms are essential for flavor development in cheese,

FOR CITATION: Falih, M. A., Alkaisy, O. H., Altemimi, A. B., Abedelmaksoud, T. G. (2026). Tracking shelf-life determinants in soft, semi-hard, and hard cheeses: A quality perspective. *Food Systems*, 9(1), 14–24. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-14-24>

Для ЦИТИРОВАНИЯ: Фалих, М. А., Алкаиси, К. Х., Альтемими, А. Б., Абедельмаксуд, Т. Г. (2026). Отслеживание детерминантов срока годности в мягких, полутвердых и твердых сырах: аспект качества. *Пищевые системы*, 9(1), 14–24. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-14-24>

uncontrolled microbial growth poses serious safety risks. Thus, periodic monitoring of microbial indicators is crucial, particularly during storage, to evaluate hygiene, shelf-life, and overall safety [3].

Additionally, cheese possesses antioxidant properties owing to peptides, amino acids, vitamins, and fatty acids. This antioxidant activity is associated with neutralizing free radicals and reducing oxidative stress, thereby providing additional health benefits [5]. The antioxidant profile of cheese can change during storage due to proteolysis and microbial activity, leading to the release of bioactive peptides with radical-scavenging and metal-reducing capacities [6,7].

Despite the importance of these parameters, few comparative studies have evaluated the chemical and microbiological quality of cheese produced in different countries under standardized storage conditions. This is particularly relevant in markets where cheeses imported from neighboring countries are widely available. Differences in manufacturing practices, heat treatment, and hygiene standards between these countries can lead to considerable variations in product quality.

Given this context, the present study examines the physicochemical characteristics, microbial quality, and antioxidant potential of soft, semi-hard, and hard cheeses from three different countries Iran, Saudi Arabia, and Turkey. This study aims to assess and compare the quality and safety of commercially available cheeses by monitoring changes in HMF content, moisture, peroxide value, microbial counts, antioxidant activity, and reducing power during refrigerated storage (4 °C), using validated analytical techniques such as HPLC, the DPPH assay, and microbiological plating methods.

2. Objects and methods

2.1. Sample collection

A total of 27 cheese samples were collected, with three replicates per type, resulting in 81 individual samples representing all cheese categories included in the study. The selected cheeses were commercially available products from various brands sold in markets and stores across Babylon Governorate, Iraq, from November 2024 to February 2025. The cheese samples from three countries: Iran, Saudi Arabia, and Turkey (A, B, and C, respectively) were categorized into three main types: soft, semi-hard, and hard cheese. All samples were assigned alphanumeric codes that indicated three attributes: cheese type, the sample number within each category (1–3), and the country of origin. Soft cheeses were labeled with the prefix CHS, semi-hard cheeses with CHM, and hard cheeses with CHH. The letters I, S, and T represented cheeses from countries A, B, and C, respectively.

Accordingly, the soft cheese samples were designated as CHS1-I, CHS2-I, CHS3-I (country A); CHS1-S, CHS2-S, CHS3-S (country B); and CHS1-T, CHS2-T, CHS3-T (country C). The semi-hard samples included CHM1-I, CHM2-I, CHM3-I (country A); CHM1-S, CHM2-S, CHM3-S (country B); and CHM1-T, CHM2-T, CHM3-T (country C). The hard cheese samples were labeled as CHH1-I, CHH2-I, CHH3-I (country A); CHH1-S, CHH2-S, CHH3-S (country B); and CHH1-T, CHH2-T, CHH3-T (country C).

During sample selection, strict criteria were applied to ensure that the samples reflected the consumption of popular brands across different age groups and income levels, while also accounting for product availability during the study period.

To standardize the starting point for comparative analysis across the different cheese types, a “zero-time” reference point was established for all baseline analyses prior to storage. This standardization was based on production dates, with no more than five days elapsed from production date for any of the soft cheese samples, given their high perishability. For semi-hard and hard cheeses, where post-production market availability can vary, the zero-time point was defined so that selected samples differed in production date by no more than 15 days. This 15-day window was chosen because the lower moisture and higher stability of semi-hard and hard cheeses minimize significant physicochemical or microbial changes during this period, ensuring baseline consistency [8]. For example, samples available two months and two months plus 10 days after production were considered to fall within the same zero-time window. This reference point served as a unified baseline for evaluation, ensuring consistency in comparisons across cheese types and countries of origin and improving the accuracy of subsequent storage-related assessments.

2.2. Determination of Hydroxymethylfurfural (HMF)

A 0.5 g portion of the cheese sample was placed into a 50 mL centrifuge tube. To this, 9 mL of ultrapure water (containing 0.1% formic acid) was added, followed by 0.5 mL of Carrez I solution (potassium ferrocyanide) and 0.5 mL of Carrez II solution (zinc acetate). The mixture was homogenized for 1 minute and then centrifuged at 4,000 rpm for 10 minutes at 4 °C (Anezka T 30B centrifuge, Janetzki and Schnuch AG,

Germany). The supernatant was transferred to a new 50 mL centrifuge tube. An additional 5 mL of ultrapure water was added to the residue, followed by homogenization and centrifugation as previously described. This step was repeated once more, collecting the upper liquid layer (supernatant) each time.

From the pooled supernatant, 1 mL was transferred to a 1.5 mL Eppendorf tube and centrifuged at 14,000 rpm for 10 minutes at 4 °C (MSB010, CX1.5, Gallenkamp, England). The resulting supernatant was filtered through a 0.2 µm membrane filter [9,10].

For HPLC analysis, 20 µL of the filtered extract was injected directly into the system. An HPLC-DAD system (Azura, Knauer, Germany) equipped with an automatic injector (D1357) and a diode array detector (DAD 2.1L) was used. Detection was performed at 285 nm. The mobile phase consisted of water: methanol (10:90 v/v) at a flow rate of 1 mL/min. Separation was achieved using a C18 column (Shimpack, Shimadzu, Japan) measuring 4.6×250 mm. A standard calibration curve for HMF was prepared at concentrations of 0, 0.05, 0.5, 5, 25, and 50 µg/mL.

2.3. Microbiological analysis of cheese samples

Prior to conducting the microbiological tests, 10 g of each cheese sample was homogenized in 90 mL of sterile 2% (w/v) sodium citrate solution. Serial decimal dilutions were then prepared using sterile 0.1% peptone water. Microbiological analysis was performed by enumerating the following microorganisms as described by Hernández-Morales et al. [11] and Rashtchi et al. [12]: Total viable count was determined on nutrient agar. *Staphylococcus aureus* was enumerated on Mannitol Salt Agar (MSA). The medium was sterilized at 121 °C for 15 minutes (Systec: yx-280b, Italy). The samples were inoculated using the pour plate technique and incubated at 37 °C for 24 hours (FAV 061, Memmert, England). Colony-forming units were expressed as log cfu/g for all cheese samples [13]. *Escherichia coli* was detected on MacConkey agar using the pour plate method. Samples were incubated at 37 °C for 24 hours (FAV 061, Memmert, England), and colonies were then counted [14]. *Salmonella* spp. detection was carried out by weighing 1 g (Ohauscalaxy Germany) of each cheese sample and pre-enriching it in Tetrathionate broth, followed by incubation at 37 °C for 24 hours (FAV 061, Memmert, England). One milliliter of the first dilution was then plated onto Salmonella-Shigella agar; and incubated at 37 °C for 24 hours (FAV 061, Memmert, England). Grown colonies were counted accordingly [15]. Yeasts and molds were enumerated on Potato Dextrose Agar (PDA) prepared by dissolving 39 g in 1 L of water and sterilized at 121 °C for 15 minutes (Systec: yx-280b, Italy). Chloramphenicol was prepared by dissolving 1 g in 10 mL of 70% ethanol, and 1 mL of the prepared solution was added per liter of PDA. The pour plate technique was used for inoculation, and plates were incubated at 25 °C for 5–7 days (FAV 061, Memmert, England) [16].

2.4. Preparation of water-soluble extracts (WSEs) of cheese

Twenty grams of freeze-dried cheese samples were ground into a fine powder and mixed with 180 mL of distilled water. The mixture was then sonicated in an ultrasonic water bath (Model LUC-405, Labocon, United Kingdom) for 60 minutes at 40 °C. After cooling, the water-soluble extract (WSE) was centrifuged at 6000×g for 20 minutes at 4 °C (Anezka T 30B centrifuge, Janetzki and Schnuch AG, Germany) to remove the fat layer. The supernatant was filtered through Whatman No. 2 filter paper, followed by additional filtration through a 0.22 µm membrane filter to remove residual impurities. The clarified WSE was stored at –20 °C until further analyses were performed [17].

2.5. Antioxidant activity determination

The antioxidant activity of the water-soluble extracts (WSEs) was determined using the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) assay, as described by Uzunsoy [18]. A volume of 1.5 mL of WSE was mixed with 1.5 mL of freshly prepared DPPH solution (60 µM in 95% methanol) and incubated in the dark at room temperature for 45 minutes. Absorbance was then measured at 517 nm using a UV-visible spectrophotometer (SP-3000nano, Optima, Japan). The radical-scavenging activity of the WSEs was calculated using the following equation:

$$\text{DPPH radical scavenging activity (\%)} = [1 - (A_{\text{WSE}}/A_{\text{B}})] \times 100, \quad (1)$$

where A_{B} is the absorbance of the blank (deionized water); A_{WSE} is the absorbance of the sample (Water-Soluble Extract, WSE).

2.6. Reducing power assay

The reducing power assay was conducted according to the method described by Ramos et al. [19] with slight modifications. A volume of 250 µL of the water-soluble extract (WSE) was mixed with 250 µL of phosphate buffer (0.2 M, pH 6.6) and 250 µL of potassium ferricyanide (1%). The mixture was incubated at 50 °C for 20 minutes (FAV 061, Memmert, England). Subsequently, 250 µL of trichloroacetic acid (10%) was added, and the

mixture was centrifuged at 3000 rpm for 10 minutes (Model: PLC-036H, Labnet, USA). From the resulting supernatant, 500 µL was collected and mixed with 400 µL of distilled water and 100 µL of ferric chloride (0.1 %). The final mixture was incubated at 50 °C for 10 minutes. Absorbance was measured at 700 nm using a UV-visible spectrophotometer (SP-3000nano, Optima). The reducing power of the sample was calculated as follows:

$$(\%) \text{ Reducing power} = [(Abs_M - Abs_B) / Abs_M] \times (100), \quad (2)$$

where Abs_M is the absorbance of the sample; Abs_B is the absorbance of the blank.

2.7. Storage evaluation

Storage tests were conducted at 4 °C for different cheese types: soft cheeses were evaluated at 0, 7, 14, 21, and 28 days of storage, while semi-hard and hard cheeses were evaluated at 0, 15, 30, 45, and 60 days.

2.8. Determination of moisture content

The moisture content of the cheese samples was determined by drying the samples in an oven at 105 °C (Schutzart-Din 4005 D-IP, Germany) until a constant weight was achieved. The moisture content was calculated based on weight loss, according to the method described by Cebeci et al. [20].

2.9. Determination of peroxide value

The peroxide value was determined according to the method of Saad et al. [21]. Briefly, 5 g of cheese was dissolved in 30 mL of glacial acetic acid/chloroform mixture (3:2, v/v). Then, 1 mL of saturated potassium iodide solution and 40 mL of distilled water were added. The mixture was titrated with 0.1 N sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3$) until the yellow color disappeared. Next, 0.5 mL of 1 % starch solution was added, and titration continued until the blue color disappeared.

The peroxide value was calculated using the following equation:

$$\text{Peroxide value (mEq/kg sample)} = S \times N \times 1000 / W, \quad (3)$$

where S is the volume of sodium thiosulfate solution, mL; N is the normality of the sodium thiosulfate solution; W is the weight of the cheese sample, g.

2.10. Statistical analysis

The data were statistically analyzed using a two-way analysis of variance (Two-Way ANOVA) at $\alpha = 0.05$, followed by the Least Significant Difference (LSD) test for multiple comparisons. This was done to evaluate the effects of the two independent variables — cheese type and country of manufacture — as well as their first-order interaction. The analysis was performed using SPSS software, version 13 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

3. Results and discussion

3.1. Determination of Hydroxymethylfurfural (HMF)

Figure 1 presents the chromatographic profiles of hydroxymethylfurfural (HMF) standard alongside those of the cheese samples. These profiles reveal varying HMF concentrations across the samples. Table 1 displays the quantified HMF content in the tested cheese samples, with cheese samples from country A containing HMF in the range of-ND (Not Detected) to 1.8410 µg/g. In cheese samples from country B, HMF levels ranged from ND to 1.7856 µg/g, while country C samples exhibited concentrations ranging from ND to 1.4436 µg/g.

These findings are consistent with those reported by Li et al. [1], who evaluated four furfural compounds, including 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF), in various cheese types available in the Chinese market. Their results demonstrated significantly higher concentrations of furfural compounds, especially 5-HMF, in semi-hard and hard cheeses compared to

soft and fresh varieties. The researchers attributed these differences to heat processing of milk prior to cheesemaking, which may influence HMF formation. This supports the hypothesis that HMF could serve as a reliable indicator for assessing heat processing intensity [22].

Given the potential toxicity of HMF, its concentration in foods must be regulated. Current regulations by the Codex Alimentarius and the European Union specify a maximum HMF limit only for honey, ranging from 40 to 80 mg/kg, depending on the country of origin [23,24]. Similarly, the International Federation of Fruit Juice Producers [25] recommends a maximum concentration of 10 mg/L in fruit juices and 25 mg/kg in fruit juice concentrates. Additionally, the Codex standard [24] considers a concentration of 25 mg/kg in apple juice as a marker of degradation and/or excessive heat treatment.

Despite its toxicological importance, no maximum allowable HMF concentration has been established for other food categories [26–28]. According to Xing et al. [29], HMF levels in dairy products ranged from 37 to 891 mg/kg as measured by HPLC-DAD, although other studies have reported varying concentrations across dairy products.

3.2. Analysis of microbiological indicators

Table 2 shows the bacterial counts in the cheese samples. ANOVA results revealed significant differences ($p < 0.05$) in bacterial counts across cheese types and countries of origin, including a significant interaction effect.

The average total bacterial count was as follows: cheeses from country A, 3.595 log CFU/g; cheeses from country B, 3.357 log CFU/g; and cheeses from country C, 3.521 log CFU/g. When categorized by cheese type, the total bacterial count was highest in soft cheeses (4.226 log CFU/g), followed by semi-hard cheeses (3.458 log CFU/g) and hard cheeses (2.788 log CFU/g). All values were below the maximum permissible limit of 5.47 log CFU/g as defined by the European Commission [30].

Table 2 also highlights the presence of yeasts and molds in cheese samples from all three countries. ANOVA confirmed significant differences ($p < 0.05$) in yeast and mold counts based on cheese type and origin, including a significant interaction effect. Generally, cheeses from Country C exhibited higher contamination levels compared to those from Countries B and A. Regarding cheese type, soft cheeses contained significantly higher yeast and mold populations than semi-hard and hard varieties. Notably, the mean count in soft cheeses approached the acceptable limit of 2 log CFU/g defined by the standard [14], whereas counts in semi-hard and hard cheeses remained well below this threshold.

Airborne contamination, production equipment, and plastic packaging films are major sources of mold contamination in cheeses. Airborne transmission is particularly critical, as the presence of molds negatively affects the sensory qualities of cheese and poses a potential health risk due to their ability to produce mycotoxins [31].

The results also confirmed the presence of *Staphylococcus* spp. in some soft and semi-hard cheese samples from the three countries, while the bacterium was not detected in any of the hard cheeses. ANOVA results showed significant differences ($p < 0.05$) between brands based on cheese type and origin, with a notable interaction effect. Although *Staphylococcus* counts varied among the three countries, with Country C exhibiting notably higher average counts than Countries A and B, all recorded levels remained significantly below the maximum permissible limit of 2 log CFU/g [32,33].

Contamination by *Staphylococcus aureus* may occur via three main pathways: presence in raw milk, cross-contamination from infected handlers, and contact with contaminated surfaces or equipment. Inadequate

Table 1. Hydroxymethylfurfural (HMF) content (µg/g) in cheese samples

Таблица 1. Содержание гидроксиметилфурфурола (ГМФ) (мкг/г) в образцах сыра

Cheese type / Country of origin	Peak area, %	Concentration, µg/ml	Sample volume, ml	Sample weight, g	Final concentration (µg/g)
CHH2-I	105.206	0.7671±0.06	1.2	0.5	1.8410±0.07
CHH3-T	100.142	0.7218±0.05	1.0	0.5	1.4436±0.09
CHM1-S	102.396	0.7440±0.06	1.2	0.5	1.7856±0.07
CHM2-T	94.241	0.6684±0.03	0.9	0.5	1.2032±0.06
CHS2-T	49.006	0.2543±0.04	0.8	0.5	0.4069±0.08
CHS1-I	37.531	0.1493±0.06	1.0	0.5	0.2987±0.03
CHS2-S	38.737	0.1603±0.04	0.8	0.5	0.2565±0.04

* Soft cheese samples: CHS1-I, CHS2-I, CHS3-I (country A); CHS1-S, CHS2-S, CHS3-S (country B); and CHS1-T, CHS2-T, CHS3-T (country C). Semi-hard samples: CHM1-I, CHM2-I, CHM3-I (country A); CHM1-S, CHM2-S, CHM3-S (country B); and CHM1-T, CHM2-T, CHM3-T (country C). Hard cheese samples: CHH1-I, CHH2-I, CHH3-I (country A); CHH1-S, CHH2-S, CHH3-S (country B); and CHH1-T, CHH2-T, CHH3-T (country C).

Table 2. Results of microbiological analysis of the cheese samples

Таблица 2. Результаты микробиологического анализа образцов сыра

Cheese sample	Total viable count, log CFU/g	<i>S. aureus</i> , log CFU/g	<i>Salmonella</i>	<i>E. coli</i> , log CFU/g	Yeasts and molds, log CFU/g
Soft cheeses					
CHS1-I	4.11±0.02	1.47±0.04	ND	1.49±0.08	1.82±0.09
CHS2-I	4.62±0.04	1.39±0.04	ND	1.43±0.06	1.91±0.05
CHS3-I	4.41±0.04	ND	ND	1.50±0.05	2.62±0.07
CHS1-S	4.12±0.06	ND	ND	1.38±0.07	2.51±0.05
CHS2-S	3.91±0.03	ND	ND	1.43±0.09	ND
CHS3-S	4.31±0.05	1.39±0.06	ND	ND	2.82±0.09
CHS1-T	4.23±0.04	1.39±0.07	ND	ND	1.81±0.06
CHS2-T	3.81±0.03	1.60±0.08	ND	ND	1.73±0.09
CHS3-T	4.52±0.08	1.00±0.05	ND	1.51±0.09	2.20±0.07
L.S.D (Cheese type)	0.260	0.155	—	0.045	0.500
L.S.D (Country of origin)	0.194	0.374	—	0.434	0.136
Semi-hard cheeses					
CHM1-I	3.54±0.07	ND	ND	ND	ND
CHM2-I	3.49±0.04	ND	ND	ND	ND
CHM3-I	3.49±0.07	ND	ND	ND	ND
CHM1-S	3.30±0.09	ND	ND	ND	1.54±0.04
CHM2-S	3.54±0.05	1.39±0.07	ND	1.44±0.07	1.60±0.07
CHM3-S	3.54±0.05	ND	ND	1.53±0.05	1.77±0.09
CHM1-T	3.59±0.05	ND	ND	1.34±0.09	1.72±0.04
CHM2-T	3.32±0.09	1.39±0.05	ND	ND	1.81±0.07
CHM3-T	3.32±0.08	1.39±0.08	ND	ND	ND
L.S.D (Cheese Type)	NS	0.461	—	0.030	0.050
L.S.D (Country of origin)	0.043	0.463	—	0.466	0.460
Hard cheeses					
CHH1-I	3.00±0.07	ND	ND	ND	ND
CHH2-I	2.80±0.08	ND	ND	ND	ND
CHH3-I	2.90±0.04	ND	ND	ND	1.72±0.06
CHH1-S	2.70±0.09	ND	ND	ND	ND
CHH2-S	2.50±0.08	ND	ND	ND	ND
CHH3-S	2.30±0.04	ND	ND	ND	1.30±0.07
CHH1-T	2.90±0.05	ND	ND	ND	1.40±0.07
CHH2-T	3.00±0.04	ND	ND	ND	1.60±0.09
CHH3-T	3.00±0.09	ND	ND	ND	1.81±0.05
L.S.D (Cheese type)	0.048	—	—	—	0.066
L.S.D (Country of origin)	0.072	—	—	—	0.140
Averages					
Soft cheeses avg.	4.226	0.915	—	0.971	2.177
Semi-hard cheeses avg.	3.458	0.463	—	0.538	0.937
Hard cheeses avg.	2.788	—	—	—	0.870
Country A avg.	3.595	0.317	—	0.491	0.896
Country B avg.	3.357	0.308	—	0.642	1.282
Country C avg.	3.521	0.752	—	0.316	1.564

* Results as mean±SD (standard deviation); ND: Not Detected; L.S.D.: Least Significant Difference; Soft cheese samples: CHS1-I, CHS2-I, CHS3-I (country A); CHS1-S, CHS2-S, CHS3-S (country B); and CHS1-T, CHS2-T, CHS3-T (country C). Semi-hard samples: CHM1-I, CHM2-I, CHM3-I (country A); CHM1-S, CHM2-S, CHM3-S (country B); and CHM1-T, CHM2-T, CHM3-T (country C). Hard cheese samples: CHH1-I, CHH2-I, CHH3-I (country A); CHH1-S, CHH2-S, CHH3-S (country B); and CHH1-T, CHH2-T, CHH3-T (country C).

pasteurization or the use of low-quality starter cultures may also contribute to contamination [34].

Table 2 indicates the presence of *Escherichia coli* in some cheese samples. ANOVA analysis revealed significant differences ($p < 0.05$) between brands across cheese types and countries of origin, with a significant interaction effect. These results suggest a correlation between cheese texture and bacterial contamination, as *E. coli* was predominantly found in soft cheeses, to a lesser extent in semi-hard cheeses, and was absent in hard cheeses.

The contamination levels were evaluated against GSO standards [33], which specify maximum limits of 1 log CFU/g for soft cheeses and 0 log CFU/g for semi-hard cheeses. While most samples adhered to these limits, samples CHM2-S, CHM3-S, and CHM1-T exceeded the permissible thresholds by 1.44, 1.53, and 1.34 log CFU/g, respectively. Notably, these exceedances were significant even when accounting for measurement uncertainty and method-related errors. All hard cheese samples from the three countries were free from *E. coli*, in compliance with the standards [33,34].

The elevated *E. coli* counts observed in some samples reflect potential deficiencies in hygiene and sanitation during manufacturing and handling. As a fecal contamination indicator, the presence of *E. coli* is of serious concern, underscoring the need for strict quality control and adherence to food safety protocols throughout the production and supply chain.

Finally, *Salmonella* spp. was not detected in any of the cheese samples, meeting the requirements of absence in 25 grams as specified by the standard [32,34].

3.3. Determination of antioxidant activity

Table 3 presents the antioxidant activity of extracts obtained from the cheese samples. The results indicate a distinct trend based on texture, with hard cheeses exhibiting the highest antioxidant activity, followed by semi-hard and soft cheeses. While significant differences were observed between cheeses from countries A and B and between B and C, no significant difference was found between countries A and C. Statistical analysis confirmed that both cheese type and country of origin significantly influenced antioxidant activity ($p < 0.0001$), with a significant interaction between these two factors.

Revilla et al. [35] and Kose and Ocak [36] attributed variations in antioxidant activity to milk type, processing methods, and storage periods. Their findings demonstrated a gradual increase in antioxidant potential over time due to ongoing proteolysis, which leads to the release of soluble peptides and sulfur-containing amino acids. In contrast to these consistent trends regarding storage time, other studies have reported divergent results at specific time points. For instance, Al-Hamdani et al. [37] observed high antioxidant activity (63%) in soft white cheese stored for 21 days, whereas no antioxidant activity was detected

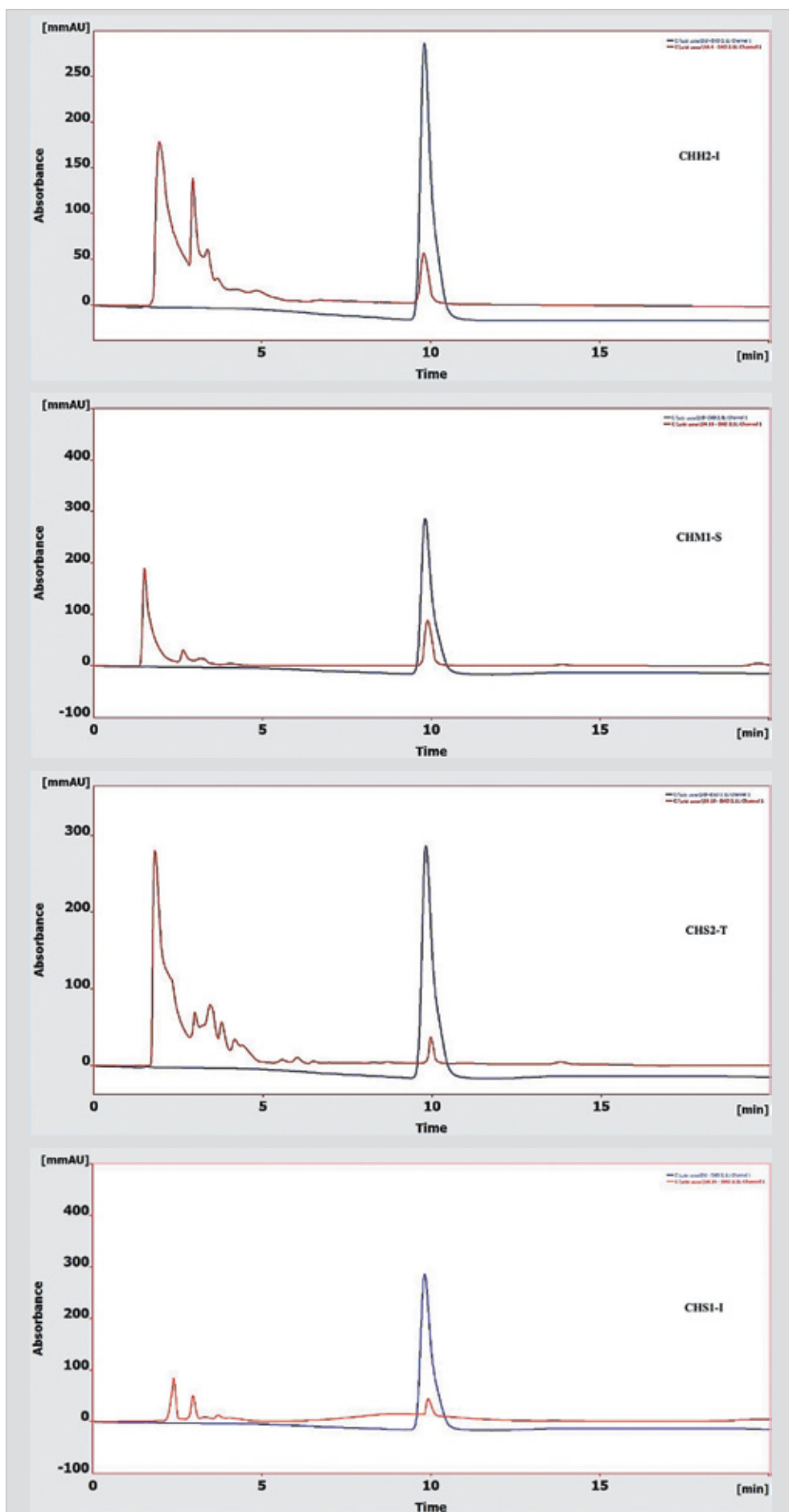


Figure 1. HPLC chromatograms of hydroxymethylfurfural (HMF) standard and cheese samples
 Рисунок 1. ВЭЖХ хроматограммы стандартного образца гидроксиметилфурфура (ГМФ) и образцов сыра

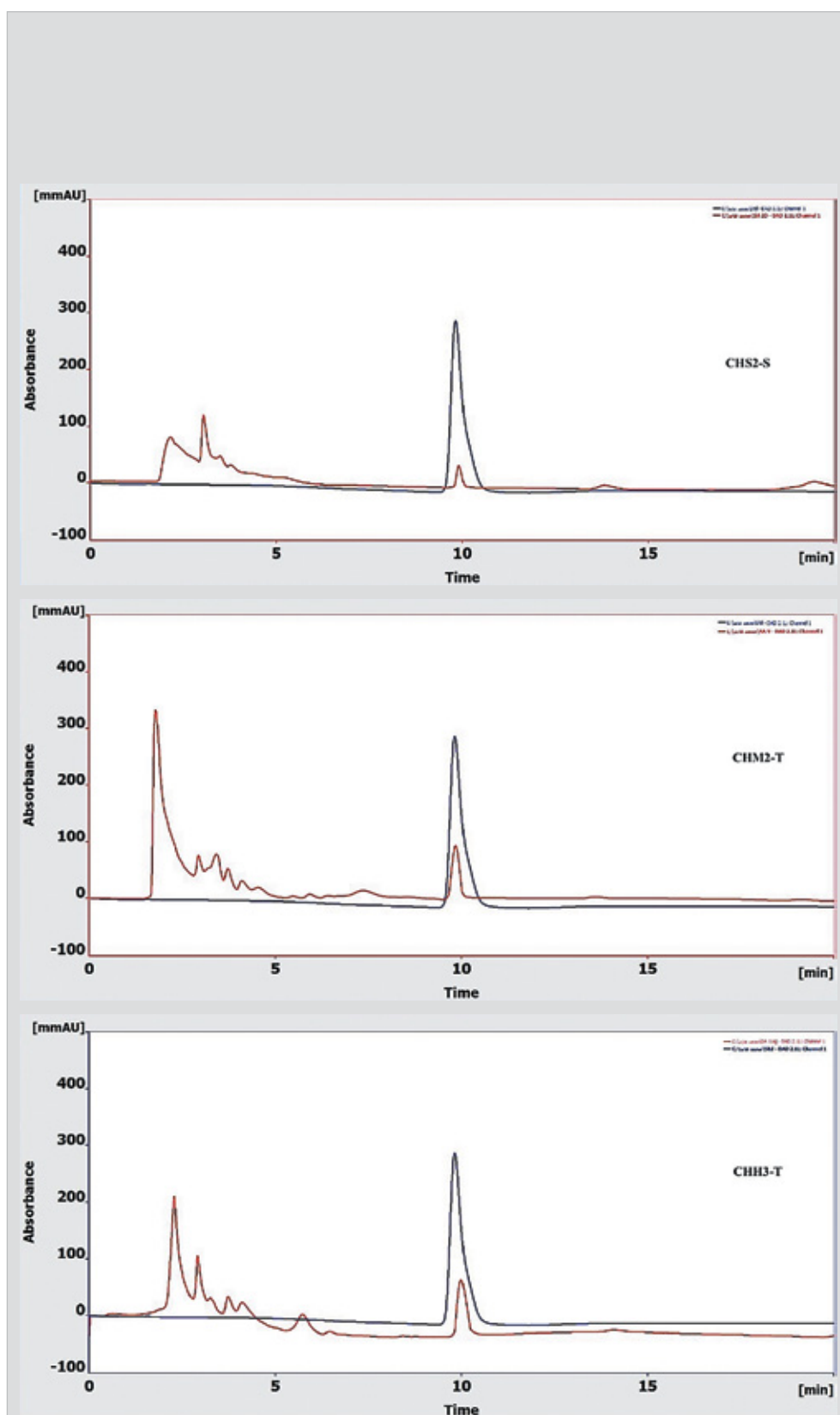


Figure 1 (end). HPLC chromatograms of hydroxymethylfurfural (HMF) standard and cheese samples

Рисунок 1 (окончание). ВЭЖХ хроматограммы стандартного образца гидроксиметилфурфура (ГМФ) и образцов сыра

in extracts of full-fat and low-fat soft cheese in other research [38]. Given that the soft cheeses in the present study were analyzed after 28 days at 4°C, the lower activity observed here (compared to Al-Hamdani) suggests that specific compositional differences, rather than storage duration, were primarily responsible for the variation. The antioxidant activity values for semi-hard cheeses in the present study were notably higher than the $23.35 \pm 0.82\%$ reported by Uzunsöy [18] for Camis cheeses after 30 days of storage. This increase is consistent with the effect of ripening time, as the semi-hard cheeses in this study were stored for 60 days at 4°C, allowing for greater proteolysis compared to the 30-day period in Uzunsöy's study. Regarding hard cheeses, the findings of the current study align closely with those of Chen et al. [39], who reported approximately 47% activity for Cheddar cheese. It is important to note that Chen et al. observed these results after a substantially longer storage period of 16 weeks (112 days), whereas the hard cheeses in the present study reached comparable levels after only 60 days. This indicates that the hard cheeses in this study underwent rapid protein degradation and release of antioxidant peptides within the first two months of storage.

3.4. Determination of reducing power

Table 3 shows the reducing power values of the cheese samples. The mean reducing power values were $42.544 \pm 8.194\%$ for cheeses from country A, $42.22 \pm 11.686\%$ for cheeses from country B, and $44.231 \pm 12.031\%$ for cheeses from country C. Regarding cheese types, the mean reducing power was $31.252 \pm 2.509\%$ for soft cheeses, $42.587 \pm 2.281\%$ for semi-hard cheeses, and $55.155 \pm 4.142\%$ for hard cheeses.

The lowest reducing power was observed in sample CHS1-I at $27.21 \pm 0.567\%$, while the highest was found in the hard cheese sample from country C (CHH1-T), at $60.56 \pm 0.523\%$.

Statistical analysis indicated significant effects of both cheese type and country of origin, along with a significant first-order interaction between these variables. Significant differences ($p < 0.05$) in reducing power were observed between cheeses from countries A and C and between cheeses from countries B and C, while no significant differences were found between cheeses from countries A and B ($p > 0.05$).

Ramos et al. [19] reported that bioactive compounds in cheese extracts possess reducing power, with the ability to donate electrons and neutralize oxidative intermediates generated during lipid oxidation. This property enables them to act as both primary and secondary antioxidants. Jafari et al. [40] observed that cheese samples exhibited higher reducing power compared to other dairy products, potentially due to a lower electrode potential (Eh) for redox reactions. While milk typically has an Eh of approximately +150 mV, cheese exhibits an Eh of around -250 mV. Although the precise mechanisms underlying this reduction remain

Table 3. Antioxidant activity and reducing power (%) in cheese samples under study

Таблица 3. Антиоксидантная активность и восстановительная способность (%) в исследуемых образцах сыра

Cheese type / Country of origin	Antioxidant activity, % ± SD	Reducing power, % ± SD
Soft cheeses		
CHS1-I	24.262 ± 0.143	30.46 ± 0.759
CHS2-I	25.117 ± 0.113	33.11 ± 1.018
CHS3-I	28.078 ± 0.154	36.14 ± 1.109
CHS1-S	28.386 ± 0.588	27.21 ± 0.567
CHS2-S	27.740 ± 0.514	30.51 ± 0.986
CHS3-S	28.424 ± 0.314	29.44 ± 0.575
CHS1-T	28.921 ± 0.212	31.47 ± 0.674
CHS2-T	29.565 ± 0.154	29.42 ± 0.560
CHS3-T	30.869 ± 1.324	33.51 ± 0.511
Semi-hard cheeses		
CHM1-I	40.435 ± 0.929	40.62 ± 0.690
CHM2-I	40.121 ± 0.815	44.41 ± 0.502
CHM3-I	40.642 ± 1.039	45.11 ± 0.940
CHM1-S	35.382 ± 0.573	39.76 ± 0.120
CHM2-S	36.604 ± 0.154	40.78 ± 0.225
CHM3-S	34.535 ± 0.149	45.32 ± 0.367
CHM1-T	37.588 ± 0.605	40.21 ± 0.450
CHM2-T	38.525 ± 0.148	42.57 ± 0.228
CHM3-T	35.352 ± 0.147	44.51 ± 0.407
Hard cheeses		
CHH1-I	49.659 ± 1.714	55.62 ± 0.441
CHH2-I	47.583 ± 1.487	48.32 ± 0.510
CHH3-I	50.529 ± 0.553	49.11 ± 0.890
CHH1-S	45.328 ± 0.186	53.64 ± 0.390
CHH2-S	46.046 ± 0.155	55.73 ± 0.396
CHH3-S	47.285 ± 0.648	57.59 ± 0.566
CHH1-T	52.118 ± 0.223	60.56 ± 0.523
CHH2-T	50.606 ± 0.227	58.54 ± 0.445
CHH3-T	46.617 ± 1.179	57.29 ± 0.804
Averages by cheese type		
Soft cheeses	27.929 ± 2.066	31.252 ± 2.509
Semi-hard cheeses	37.687 ± 2.366	42.587 ± 2.281
Hard cheeses	48.419 ± 2.368	55.155 ± 4.142
Averages by country		
Cheeses from country A	38.492 ± 3.319	42.544 ± 8.194
Cheeses from country B	36.637 ± 2.526	42.220 ± 11.686
Cheeses from country C	38.870 ± 4.418	44.231 ± 12.031
Significance of variables and interactions		
Cheese type	<i>p</i> < 0.0001	<i>p</i> < 0.0001
Country of origin	<i>p</i> < 0.0001	<i>p</i> < 0.0001
Cheese type × Country interaction	<i>p</i> < 0.0001	<i>p</i> < 0.0001

* *p*-value at 0.05; Results as mean ± SD (standard deviation); Soft cheese samples: CHS1-I, CHS2-I, CHS3-I (country A); CHS1-S, CHS2-S, CHS3-S (country B); and CHS1-T, CHS2-T, CHS3-T (country C). Semi-hard samples: CHM1-I, CHM2-I, CHM3-I (country A); CHM1-S, CHM2-S, CHM3-S (country B); and CHM1-T, CHM2-T, CHM3-T (country C). Hard cheese samples: CHH1-I, CHH2-I, CHH3-I (country A); CHH1-S, CHH2-S, CHH3-S (country B); and CHH1-T, CHH2-T, CHH3-T (country C).

unclear, it is generally attributed to lactose fermentation into lactic acid by atterred bacteria and the partial reduction of oxygen to water.

Sarić et al. [41] also demonstrated that Kupres cheese, a semi-hard variety, exhibited reducing power. Key contributors to this property include free amino acids, low- and high-molecular-weight peptides, and proteins, all of which are effective at scavenging free radicals. The antioxidant activity of peptides is influenced by factors such as radical scavenging ability, metal ion binding capacity, and ferric ion reduction, which depend on the peptide's amino acid composition, molecular weight, physical structure, content of sulfhydryl-containing amino acids (e.g., cysteine and methionine), aromatic residues (e.g., tryptophan, tyrosine, and phenylalanine), histidine content, and hydrophobicity.

Furthermore, differences in reducing power among cheeses may be attributed to the content of compounds derived from milk and those generated by microbial activity. Milk-derived antioxidants include α-tocopherol, ascorbic acid, whey proteins, caseins, and minerals. Additionally, although fatty acids are not direct antioxidants, they may contribute indirectly to reducing power by interacting with other antioxidants (e.g., vitamin E and β-carotene). Microbial metabolites such as folic acid, known for its antioxidant capacity and ability to reduce Fe³⁺ to Fe²⁺, may also enhance cheese's reducing power [42].

The values obtained in the present study were notably higher than those reported by Ramos et al. [19], who found that the reducing power of Gouda cheese was 11.2% after 90 days of storage at 10 °C.

3.5. Effect of storage duration on moisture content

Figure 2A illustrates the impact of storage duration on the moisture content of the soft cheese samples, stored for 28 days at 4 °C. The moisture content of the soft cheese samples was 56.0 ± 2.5, 62.3 ± 2.3, 60.3 ± 2.6, 54.8 ± 2.5, 55.3 ± 2.8, 55.0 ± 2.51, 58.4 ± 2.4, 55.1 ± 2.5, and 61.0 ± 2.3% for CHS1-I, CHS2-I, CHS3-I, CHS1-S, CHS2-S, CHS3-S, CHS1-T, CHS2-T, and CHS3-T, respectively. The greatest reduction in moisture content was observed in CHS1-S, with a 14.10% decrease after 28 days of storage at 4 °C. Statistical analysis revealed that both cheese type and country of origin, as well as their interaction, had significant effects on moisture content.

Figure 2B shows the effect of storage time on the moisture content of the semi-hard cheese samples, stored for 60 days at 4 °C. The moisture content was 43.77 ± 2.5, 40.26 ± 2.3, 42.76 ± 2.6, 39.96 ± 2.5, 43.56 ± 2.8, 43.76 ± 2.51, 48.66 ± 2.4, 39.46 ± 2.5, and 40.06 ± 2.3% for CHM1-I, CHM2-I, CHM3-I, CHM1-S, CHM2-S, CHM3-S, CHM1-T, CHM2-T, and CHM3-T, respectively. The most significant moisture loss, 22.14%, was observed in CHM2-T after 60 days of storage at 4 °C.

Figure 2C displays the effect of storage duration on the moisture content of the hard cheese samples, stored for 60 days at 4 °C. The moisture contents were 37.31 ± 2.2, 35.36 ± 5.2, 36.35 ± 2.6, 34.24 ± 1.3, 33.34 ± 5.2, 27.59 ± 4.2, 36.41 ± 4.2, 38.19 ± 7.2, and 37.48 ± 8.2% for CHH1-I, CHH2-I, CHH3-I, CHH1-S, CHH2-S, CHH3-S, CHH1-T, CHH2-T, and CHH3-T, respectively. The greatest reduction in moisture content was observed in CHH2-T, with a 25.4% decrease after 60 days of storage at 4 °C.

These findings are consistent with those reported by Perveen et al. [43], who noted a reduction in moisture content during refrigerated storage of cheese. This moisture loss could be attributed to structural protein breakdown (syneresis), leading to water expulsion. Additionally, variations in water activity, salt content, and protein interactions contribute to the gradual reduction in the water-holding capacity of cheese over time.

3.6. Effect of storage duration on peroxide value

Table 4 presents the effect of storage duration on the peroxide value of the cheese samples. For soft cheeses stored at 4 °C for 28 days, the peroxide value showed a significant increase, rising from an initial range of 0.56–0.79 meq/kg on day 0 to a final range of 1.73–1.96 meq/kg at the end of the storage period.

Similarly, for semi-hard cheeses stored for 60 days, the peroxide value increased progressively from an initial range of 0.41–0.63 meq/kg to a final range of 1.58–1.81 meq/kg. Hard cheeses, also stored for 60 days, exhibited a comparable upward trend, with values rising from 0.44–0.61 meq/kg on day 0 to 1.63–1.76 meq/kg by day 60.

Statistical analysis revealed significant effects of both cheese type and country of origin on the peroxide value throughout the storage duration. These results align with those of Siddique and Park [44], who reported a significant increase (*p* < 0.05) in peroxide values in goat milk Cheddar cheese over four months compared to fresh samples, indicating progressive lipid oxidation during extended storage. The consistent increase observed from day 0 to the final measurement across all cheese types in the present study further confirms this progressive oxidative trend.

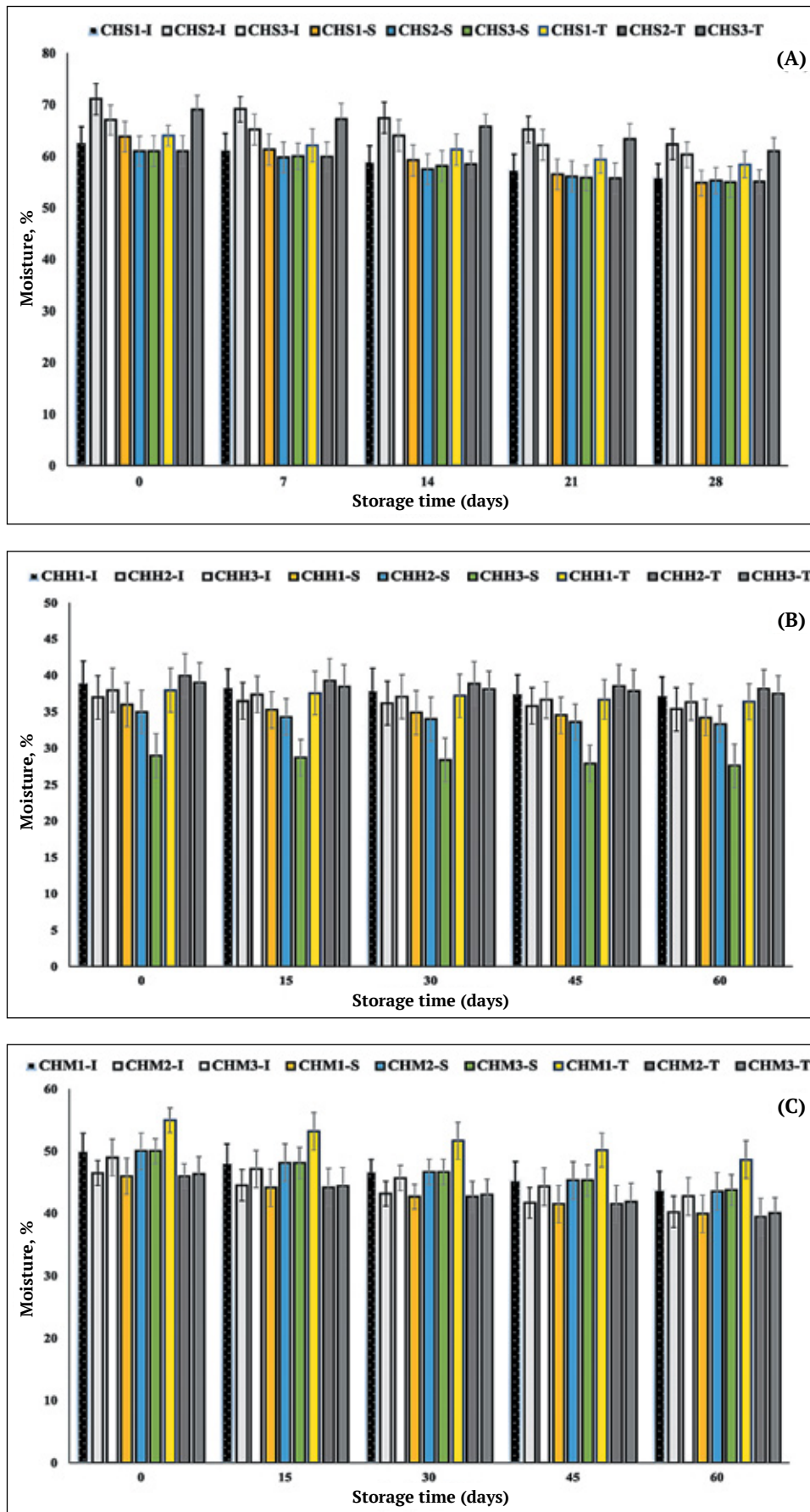


Figure 2. Effect of storage duration on the moisture content of the cheese samples (A) Soft cheeses stored at 4 °C for 28 days; (B) semi-hard cheeses, and (C) hard cheeses stored at 4 °C for 60 days

Рисунок 2. Влияние продолжительности хранения на содержание влаги в образцах сыра (A) Мягкие сыры (4 °C, 28 суток); (B) полутвердые сыры и (C) твердые сыры (4 °C, 60 суток)

Table 4. Effect of storage duration on peroxide value (meq/kg)
Таблица 4. Влияние продолжительности хранения на пероксидное число (мЭКВ/кг)

A. Soft cheeses						
Country	Cheese code	Storage duration				
		0 days	7 days	14 days	21 days	28 days
Country A	CHM1-I	0.61±0.02	0.89±0.03	1.23±0.01	1.53±0.02	1.79±0.03
	CHM2-I	0.63±0.02	0.92±0.01	1.25±0.01	1.55±0.02	1.81±0.04
	CHM3-I	0.47±0.01	0.76±0.01	1.09±0.01	1.39±0.02	1.65±0.03
Country B	CHM1-S	0.58±0.02	0.89±0.01	1.20±0.01	1.50±0.01	1.74±0.04
	CHM2-S	0.61±0.02	0.90±0.01	1.23±0.01	1.53±0.01	1.77±0.02
	CHM3-S	0.61±0.02	0.89±0.01	1.23±0.01	1.53±0.01	1.76±0.04
Country C	CHM1-T	0.51±0.02	0.80±0.01	1.13±0.01	1.43±0.01	1.68±0.03
	CHM2-T	0.41±0.02	0.72±0.01	1.03±0.02	1.33±0.01	1.58±0.04
	CHM3-T	0.50±0.05	0.79±0.01	1.12±0.03	1.42±0.02	1.67±0.03
L.S.D. for cheese type		0.035	0.020	0.016	0.016	0.040
L.S.D. for country of origin		0.023	0.027	0.030	0.030	0.028
B. Semi-hard cheeses						
Country	Cheese code	Storage duration				
		0 days	15 days	30 days	45 days	60 days
Country A	CHS1-I	0.65±0.01	0.97±0.01	1.28±0.01	1.58±0.02	1.83±0.02
	CHS2-I	0.56±0.01	0.85±0.01	1.18±0.01	1.48±0.02	1.73±0.03
	CHS3-I	0.59±0.02	0.87±0.02	1.20±0.01	1.50±0.02	1.75±0.02
Country B	CHS1-S	0.79±0.02	1.07±0.02	1.41±0.01	1.71±0.02	1.96±0.02
	CHS2-S	0.62±0.01	0.92±0.01	1.23±0.01	1.53±0.02	1.78±0.03
	CHS3-S	0.68±0.02	0.98±0.02	1.30±0.01	1.60±0.02	1.85±0.03
Country C	CHS1-T	0.60±0.01	0.90±0.01	1.22±0.01	1.52±0.02	1.77±0.02
	CHS2-T	0.57±0.01	0.88±0.01	1.19±0.01	1.49±0.02	1.74±0.03
	CHS3-T	0.71±0.01	1.01±0.01	1.33±0.01	1.63±0.02	1.88±0.03
L.S.D. for cheese type		0.027	0.026	0.026	0.026	0.026
L.S.D. for country of origin		0.026	0.033	0.027	0.026	0.026
C. Hard cheeses						
Country	Cheese code	Storage duration				
		0 days	15 days	30 days	45 days	60 days
Country A	CHH1-I	0.61±0.02	0.89±0.02	1.23±0.01	1.53±0.03	1.76±0.04
	CHH2-I	0.57±0.02	0.87±0.02	1.19±0.02	1.49±0.03	1.72±0.03
	CHH3-I	0.44±0.02	0.72±0.02	1.06±0.05	1.36±0.02	1.63±0.04
Country B	CHH1-S	0.57±0.02	0.89±0.02	1.19±0.02	1.49±0.02	1.73±0.03
	CHH2-S	0.55±0.05	0.83±0.03	1.17±0.01	1.47±0.02	1.72±0.03
	CHH3-S	0.52±0.02	0.84±0.03	1.14±0.01	1.44±0.04	1.69±0.03
Country C	CHH1-T	0.53±0.02	0.85±0.02	1.15±0.01	1.45±0.02	1.69±0.03
	CHH2-T	0.56±0.02	0.86±0.02	1.18±0.01	1.48±0.03	1.73±0.04
	CHH3-T	0.55±0.02	0.85±0.02	1.17±0.02	1.47±0.04	1.72±0.03
L.S.D. for cheese type		0.055	0.047	0.056	0.055	0.057
L.S.D. for country of origin		NS	0.025	NS	NS	NS

* Results as mean ± SD (standard deviation); L.S.D.: Least Significant Difference; NS: Not significant ($p > 0.05$).

4. Conclusion

The present study provides a comprehensive comparison of cheese quality parameters across products from three different countries (Iran, Saudi Arabia, and Turkey). Findings reveal that cheese type significantly influences physicochemical profiles, with hard cheeses exhibiting superior antioxidant capacity due to advanced proteolysis and texture-dependent composition, while country of origin affects initial microbial quality and specific compositional variations. HMF accumulation was more pronounced in semi-hard and hard cheeses, reflecting the impact of prolonged ripening periods and the progression of Maillard reactions during storage rather than initial heat treatment. While bacterial counts were generally

within acceptable limits, some soft cheese samples exhibited elevated E. coli counts, suggesting lapses in hygiene or post-processing contamination that require targeted intervention. The antioxidant potential, assessed through DPPH and reducing power assays, was highest in hard cheeses, supporting their functional food value. These findings underscore the need for strict adherence to type-specific storage protocols and enhanced monitoring of microbial safety to ensure consistent quality, particularly for imported products. Moreover, the role of cheese as a source of antioxidants may provide functional food benefits if appropriately processed and stored. Further studies should explore peptide profiling and metabolomic changes during storage to optimize cheese quality and safety.

REFERENCES

- Li, Y., Zhang, J., Lv, M., Bai, Y., Weng, X., You, C. et al. (2021). Voltammetric determination of 5-hydroxymethyl-2-furfural in processed cheese using an easy-made and economic integrated 3D graphene-like electrode. *Sensors*, 22(1), Article 64. <https://doi.org/10.3390/s22010064>
- Mesa, N. C., dos Anjos Pinto, C. B., Schwarzenbolz, U., Förster, A., Henle, T., Wolfschoon-Pombo, A. F. et al. (2025). Quantification of Maillard reaction products in Doce de Leite. *ACS Food Science and Technology*, 5(5), 1807–1816. <https://doi.org/10.1021/acsfodsctech.4c00959>
- Choi, K.-H., Lee, H., Lee, S., Kim, S., Yoon, Y. (2016). Cheese microbial risk assessments – A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 29(3), 307–314. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0532>
- Primavilla, S., Roila, R., Rocchegiani, E., Blasi, G., Petruzzelli, A., Gabucci, C. et al. (2023). Assessment of the microbiological safety and hygiene of raw and thermally treated milk cheeses marketed in Central Italy between 2013 and 2020. *Life*, 13(12), Article 2324. <https://doi.org/10.3390/life13122324>
- Khan, I. T., Nadeem, M., Imran, M., Ullah, R., Ajmal, M., Jaspal, M. H. (2019). Antioxidant properties of milk and dairy products: A comprehensive review of the current knowledge. *Lipids in Health and Disease*, 18, Article 41. <https://doi.org/10.1186/s12944-019-0969-8>
- Hernández-Galán, L., Cardador-Martínez, A., Picque, D., Spinnler, H. E., Lozano, M. L. -d. -C., del Campo, S. T. M. (2016). ACEI and antioxidant peptides release during ripening of Mexican Cotija hard cheese. *Journal of Food Research*, 5(3), 85–91. <http://doi.org/10.5539/jfr.v5n3p85>
- Iwaniak, A., Mogut, D., Minkiewicz, P., Żulewska, J., Darewicz, M. (2022). An integrated approach to the analysis of antioxidant peptides derived from Gouda cheese with a modified β -casein content. *Scientific Reports*, 12(1), Article 15314. <http://doi.org/10.1038/s41598-022-17641-x>
- Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., McSweeney, P. L. H. (2017). *Fundamentals of cheese science*. Boston, MA, USA: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7681-9>
- Bouzalakou-Butel, L. -A., Provatidis, P., Sturrock, K., Fiore, A. (2018). Primary investigation into the occurrence of hydroxymethylfurfural (HMF) in a range of smoked products. *Journal of Chemistry*, 2018(1), Article 5942081. <http://doi.org/10.1155/2018/5942081>
- Baltacı, C., Akşit, Z. (2016). Validation of HPLC method for the determination of 5-hydroxymethylfurfural in pestil, köme, jam, marmalade and pekmez. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 3(2), 91–97. <http://doi.org/10.17350/HJSE19030000037>
- Hernández-Morales, C., Hernández-Montes, A., Aguirre-Mandujano, E., de Gante, A. V. (2010). Physicochemical, microbiological, textural and sensory characterisation of Mexican Añejo cheese. *International Journal of Dairy Technology*, 63(4), 552–560. <http://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2010.00615.x>
- Rashtchi, P., Bazmi, A., Noshirvani, N., Moosavy, M. H. (2021). Comparison of the microbial, physicochemical, and sensorial properties of raw and pasteurized Lighvan cheeses during ripening time. *Food Science and Nutrition*, 9(4), 5527–5535. <http://doi.org/10.1002/fsn5.2511>
- Tasse, I., Mengistu, D. A., Belina, D., Girma, S. (2022). Detection and determination of *Staphylococcus aureus* in camel milk and associated factors in fedis, eastern hararghe, Ethiopia. *Microbiology Insights*, 15, 1–7. <http://doi.org/10.1177/11786361221099876>
- Ali, D., Jarjees, K.K., Jarjees, R.K. (2020). Microbial and physicochemical quality of Kurdish soft cheese in retail markets in Erbil. *Tikrit Journal for Agricultural Sciences*, 20(1), 58–67. <http://doi.org/10.25130/tjas.20.1.6>
- Salazar, J. R. L., Ullauri, V. G. L., Tapia, M. F. B., Aguirre, S. I. H. (2023). Salmonella prevalence in fresh cheese and its incidence in public health. *Migration Letters*, 20(S10), 643–648.
- Solefack, E. N., Tiencheu, B., Zokou, R., Tiwo, C. T., Kohole, A. H. F., Teboukou, G. B. et al. (2024). Microbiological quality of commercial soy cheese (Tofu) skewers and determination of Critical Control Points during production in the West Region of Cameroon. *Journal of Food Quality and Hazards Control*, 11(1), 26–38.
- Ki, W., Renchinkhand, G., Bae, H., Nam, M. S. (2024). Antioxidant, antihypertensive, and anti-inflammatory activities of long-term ripened cheddar cheese water-soluble extract. *Food Science of Animal Resources*, 44(6), 1373–1388. <http://doi.org/10.5851/kosfa.2024.e83>
- Uzunsoy, I. (2024). Antimicrobial and antioxidant activities of water-soluble extracts of Camis cheeses produced by different traditional methods. *Food Science and Nutrition*, 12(9), 6699–6710. <http://doi.org/10.1002/fsn3.4305>
- Ramos, L. Á., Baez, D. A., Ortiz, G. D., Ruiz, J. C. R., López, V. M. T. (2022). Antioxidant and antihypertensive activity of Gouda cheese at different stages of ripening. *Food Chemistry: X*, 14, Article 100284. <http://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100284>
- Cebeci, A., Yaman, M., Yalçın, B., Güneş, F. E. (2020). Determination of carbohydrate amounts of various cheese types presented to sale in the market. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 5(6), 30–35.
- Saad, A. H., Salama, E., Sweedy, M. Y., Abd Algwad, A. (2023). Fatty acid analysis of soft cheese using gas chromatography as a prospective method for the detection of cheese adulterations with vegetable oil. *Journal of Advanced Veterinary Research*, 13(6), 1011–1016.
- Magarinos, H., Vargas, M., Romero, A., Carrasco, E., Selaive, S. (2009). Use of reconstituted concentrated nonfat milk for the production of UHT milk: Physical and chemical effects and stability. *International Journal of Dairy Technology*, 62(2), 182–188. <http://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2009.00460.x>
- Gaspar, E. M.C.M., Lucena, A. F. F. (2009). Improved HPLC methodology for food control – furfurals and patulin as markers of quality. *Food Chemistry*, 114(4), 1576–1582. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.11.097>
- Codex Alimentarius Commission. (2001). Revised codex standard for honey. Retrieved from <https://www.ihc-platform.net/codex2001.pdf>. Accessed June 5, 2025.
- Shapla, U. M., Soleyman, Md., Alam, N., Khalil, Md. I., Gan, S. H. (2018). 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) levels in honey and other food products: Effects on bees and human health. *Chemistry Central Journal*, 12(1), Article 35. <https://doi.org/10.1186/s13065-018-0408-3>
- Capuano, E., Fogliano, V. (2011). Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural (HMF): A review on metabolism, toxicity, occurrence in food and mitigation strategies. *LWT-Food Science and Technology*, 44(4), 793–810. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.11.002>
- FAO, WHO. (2019). Safety and quality of water used in food production and processing – meeting report. Microbiological Risk Assessment Series no. 35. Rome. Retrieved from <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/327724/9789241516402-eng.pdf?sequence=1> Accessed June 5, 2025.
- Lee, C. -H., Chen, K. -T., Lin, J. -A., Chen, Y. -T., Chen, Y. -A., Wu, J. -T. et al. (2019). Recent advances in processing technology to reduce 5-hydroxymethylfurfural in foods. *Trends in Food Science and Technology*, 93, 271–280. <http://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.021>
- Xing, Q., Fu, X., Liu, Z., Cao, Q., You, C. (2021). Contents and evolution of potential furfural compounds in milk-based formula, ultra-high temperature milk and pasteurised yoghurt. *International Dairy Journal*, 120, Article 105086. <http://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105086>
- European Communities (EC). (2005). European Commission Regulation (EC) No 2073/2005 of 15 November 2005 on microbiological criteria for foodstuffs. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2005/2073/oj/eng> Accessed June 5, 2025.
- Wouters, J. T., Ayad, E. H., Hugenholtz, J., Smit, G. (2002). Microbes from raw milk for fermented dairy products. *International Dairy Journal*, 12(2–3), 91–109. [http://doi.org/10.1016/S0958-6946\(01\)00151-0](http://doi.org/10.1016/S0958-6946(01)00151-0)
- Food and Drug Administration. (2022). FDA Circular No. 2022–012: Guidelines on the microbiological quality of processed food products. Retrieved from <https://www.fda.gov/ph/wp-content/uploads/2022/12/FDA-Circular-No.2022-12-2> Accessed June 5, 2025.
- Gulf Cooperation Council Standardization Organization. (2015). Microbiological criteria for foodstuffs (GSO 1016/2015). Retrieved from <https://old.dalrdr.gov.za/daoDev/sideMenu/foodSafety/doc/Microbiological%20Criteria%20GSO-1016-2015-E>. Accessed June 5, 2025.
- C.O.S.Q.C. (Iraq). (2021). Guide to the Pre-shipment Inspection and Verification Program for Goods Exported to Iraq (ICIGI) (2020–2022) Retrieved from https://www.cosqc.gov.iq/files/Guide_files/9.pdf. Accessed June 5, 2025. (In Arabic)
- Revilla, I., González-Martín, M. I., Vivar-Quintana, A. M., Blanco-López, M. A., Lobos-Ortega, I. A., Hernández-Hierro, J. M. (2016). Antioxidant capacity of different cheeses: Affecting factors and prediction by near infrared spectroscopy. *Journal of Dairy Science*, 99(7), 5074–5082. <http://doi.org/10.3168/jds.2015-10564>
- Kose, S., Ocaik, E. (2020). Determination of antioxidant and antimicrobial activity of Herby cheese. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(11), Article e14841. <http://doi.org/10.1111/jfpp.14841>
- Al-Hamdani, H. M., Ahmed, S. H., Khudadat, S. (2021). Developing soft cheese industry supported with medicinal herbs as functional food. *Iraqi Journal of Market Research and Consumer Protection*, 13(1), 1–13. <http://doi.org/10.28936/jmracp13.1.2021.1>
- Shelke, G. N., Kad, V. P., Yenge, G. B., Kukde, R. B., Kakade, S. R., Al-Dalain, S. Y. et al. (2023). Physicochemical attributes, antioxidant activity, and sensory responses of low-fat cheese supplemented with spray-dried Jamun juice (*Syzygium cumini* L.) powder. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, Article 1243477. <http://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1243477>
- Chen, P., Liu, L., Zhang, X., Bora, A. F. M., Li, X., Zhao, M. et al. (2019). Antioxidant activity of Cheddar cheese during its ripening time and after simulated gastrointestinal digestion as affected by probiotic bacteria. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 218–229. <http://doi.org/10.1080/10942912.2019.1579836>
- Jafari, M., Khaniki, G. J., Roshanzamir, M., Sadighara, P. (2017). Antioxidant activity of raw milk and dairy products commonly consumed in Fars province, Iran. *Journal of Food Safety and Hygiene*, 3(1/2), 21–26.
- Sarić, Z., Hozici, L., Žilić, S., Dizdarević, T., Sredović-Ignjatović, I., Špirović, B. et al. (2022). Protein, fatty acid, mineral profiles and antioxidant potential of Kupres cheese at different stage of ripening. *Mljekarstvo: Journal for Dairy Production and Processing Improvement*, 72(4), 189–200. <http://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2022.0401>
- Barac, M., Vucic, T., Zilic, S., Pesic, M., Sokovic, M., Petrovic, J. et al. (2019). The effect of in vitro digestion on antioxidant, ACE-inhibitory and antimicrobial potentials of traditional Serbian white-brined cheeses. *Foods*, 8(3), Article 94. <https://doi.org/10.3390/foods8030094>
- Perveen, K., Alabdulkarim, B., Arzoo, S. (2011). Effect of temperature on shelf life, chemical and microbial properties of cream cheese. *African Journal of Biotechnology*, 10(74), 16924–16928. <https://doi.org/10.5897/AJB11.1695>
- Siddique, A., Park, Y. W. (2018). Evaluation of correlation between acid degree value and peroxide value in lipolysis of control and iron fortified caprine milk cheeses during 4 months storage. *Open Journal of Animal Sciences*, 9, 1–11. <https://doi.org/10.4236/ojas.2019.91001>

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	Принадлежность к организации
<p>Mohammed A. Falih, MSc Student, Department of of Dairy Science and Technology, College of Food Sciences, University of AL-Qasim Green Al-Qasim, 51013, Iraq E-mail: mrmr26102018@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6763-4815</p>	<p>Фалих М. А. — магистрант, Факультет науки и технологии молока, Колледж пищевых наук, Университет Аль-Касим Грин Аль-Касим, 51013, Ирак E-mail: mrmr26102018@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6763-4815</p>
<p>Qausar Hamed Alkaisy, Assistant Professor, Department of Dairy Science and Technology, College of Food Sciences, University of AL-Qasim Green Al-Qasim, 51013, Iraq E-mail: qayssarhamad@fosci.uoqasim.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0363-6886</p>	<p>Алкаиси К. Х. — доцент, Факультет науки и технологии молока, Колледж пищевых наук, Университет Аль-Касим Грин Аль-Касим, 51013, Ирак E-mail: qayssarhamad@fosci.uoqasim.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0363-6886</p>
<p>Ammar B. Altemimi, Professor, Department of Food Science, College of Agriculture, University of Basrah Basrah, 61004, Iraq College of Medicine, University of Warith Al-Anbiyaa Karbala, 56001, Iraq E-mail: ammar.ramddan@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7750-5988 * corresponding author</p>	<p>Алтемими А. Б. — профессор, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный колледж, Университет Басры Басра, 61004, Ирак Медицинский колледж, Университет Варит Аль-Анбия Кербела, 56001, Ирак E-mail: ammar.ramddan@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7750-5988 * автор для контактов</p>
<p>Tarek G. Abedelmaksoud, Associate Professor, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt E-mail: tareekgamal_88@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7012-6667 * corresponding author</p>	<p>Абедельмаксуд Т. Г. — адъюнкт-профессор, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 E-mail: tareekgamal_88@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7012-6667 * автор для контактов</p>
Contribution	Критерии авторства
<p>Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.</p>	<p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.</p>
Conflict of interest	Конфликт интересов
<p>The authors declare no conflict of interest.</p>	<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-25-31>

Поступила 28.11.2025

Поступила после рецензирования 18.02.2026

Принята в печать 24.02.2026

© Нициевская К. Н., Станкевич С. В., Бородай Е. В., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПЛОДАХ *SORBUS AUCUPARIA* НЕСТАНДАРТНЫМИ МЕТОДАМИ

Нициевская К. Н., Станкевич С. В., Бородай Е. В.*

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, р. п. Краснообск, Новосибирская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

плоды *Sorbus aucuparia*, сушка, замораживание, фенольные соединения, флавоноиды, нестандартные методы

Фенольные соединения являются важными биологически активными веществами, отвечающими за цвет, вкус и аромат растительного сырья. В статье представлены результаты исследований растительного сырья, а именно *Sorbus aucuparia* (рябины красной), по содержанию фенольных соединений. Для исследования были отобраны по 3 образца из обезвоженных и замороженных плодов рябины красной сорта *Nevezhinskaya*. Выбор методов анализа фенольных соединений в плодах рябины красной осуществлялся на основе изучения нормативной документации, регламентирующей методы определения биологически активных веществ фенольной природы, а также научно-технических публикаций по данной теме. Для экстракции были выбраны ацетон и этанол; количественное определение проводили фотоэлектроколориметрическим и титриметрическим методами. Проведено сравнение результатов, полученных разными методами. Установлено, что наибольшее количество фенольных соединений экстрагируется этанолом (40%). В качестве подходящего сырья были определены замороженные плоды рябины красной. Полученные данные могут быть использованы при разработке методов анализа фенольных соединений в растительном сырье.

Received 28.11.2025

Accepted in revised 18.02.2026

Accepted for publication 24.02.2026

© Nitsievskaya K. N., Stankevich S. V., Boroday E. V., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

DETERMINATION OF THE CONTENT OF PHENOLIC COMPOUNDS IN *SORBUS AUCUPARIA* FRUITS BY NONSTANDARD METHODS

Kseniya N. Nitsievskaya, Svetlana V. Stankevich, Elena V. Boroday*

Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia

KEYWORDS:

Sorbus aucuparia fruits, drying, freezing, phenolic compounds, flavonoids, nonstandard methods

ABSTRACT

Phenolic compounds are important biologically active substances that are responsible for color, taste and aroma of plant raw materials. The paper presents the results of the study of the plant raw material, namely *Sorbus aucuparia* (mountain ash), in terms of the content of phenolic compounds. For investigation, three samples were taken from dried and frozen fruits of mountain ash of the *Nevezhinskaya* variety each. Methods for the analysis of phenolic compounds in the mountain ash fruits were chosen based on the study of the normative documentation regulating methods for determining biologically active phenolic substances as well as the scientific-technical publications on this theme. Acetone and ethanol were chosen for extraction. Quantification was performed by the photoelectrocolorimetric and titrimetric methods. The comparison of the results obtained by different methods was carried out. It has been established that the highest quantity of phenolic compounds was extracted by ethanol (40%). Frozen mountain ash fruits were found to be the most suitable raw material. The data obtained can be used in the development of the methods for analysis of phenolic compounds in plant raw materials.

1. Введение

1.1. Химическая природа фенольных соединений

Биологически активные вещества имеют различную химическую природу. Отдельно следует выделить группу фенольных соединений, ключевая роль которых заключается в обеспечении антиоксидантной защиты растения от воздействия свободных радикалов и, как следствие, в снижении окислительного стресса.

Состав соединений фенольной природы в плодах *Sorbus aucuparia* (далее — рябины красной) отражен во многих научных работах. Исследуемые плоды описываются как растительное сырье, содержащее как полимерные фенольные соединения (рутин, изокверцетин, кверцетин), так и мономерные (кумарины, катехины, антоцианы, лейкоантоцианы и халконы, относящиеся к ряду флавоноидов). Фенольные соединения описываются авторами как химические соединения полимерной природы с выраженной антиоксидантной активностью; такие свойства выявлены у кофейлхинных кислот, флавоноидов и проантоцианидинов [1, 2]. Фитохимический профиль плодов и вегетативных частей рябины выполняет функцию защиты от экзогенных и эндогенных факторов стресса; листья и плоды раз-

личных сортов и видов используются в народной медицине и в пищевых целях [3].

В этнофармакологии фенольные соединения растений используются в качестве натуральных средств для лечения бактериальных, вирусных и воспалительных заболеваний, в том числе опухолей, а также для лечения диабета, неврологических и сердечно-сосудистых заболеваний [4]. Фармакологическое действие перечисленных фенольных соединений свидетельствует об их капилляроукрепляющем и гипотензивном эффектах. Галловая кислота, кемпферол, куркумин, кверцетин и ресвератрол являются мощными противоопухолевыми агентами и антиоксидантами; их действие связано с активацией онкогенов и инактивацией генов-супрессоров опухолей [5]. Фенольное соединение аукупарин, выделенное из плодов рябины красной, препятствует развитию фиброза легких благодаря противовоспалительному действию и подтверждает свой потенциал в качестве терапевтического средства при лечении идиопатического легочного фиброза [6]. Фенольные соединения считаются защитными агентами с терапевтическим потенциалом в условиях окислительного стресса; в научной литературе также описаны их цитотоксические свойства в отношении раковых клеток [2].

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Нициевская, К. Н., Станкевич, С. В., Бородай, Е. В. (2026). Определение содержания фенольных соединений в плодах *Sorbus aucuparia* нестандартными методами. *Пищевые системы*, 9(1), 25–31. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-25-31>

FOR CITATION: Nitsievskaya, K. N., Stankevich, S. V., Boroday, E. V. (2026). Determination of the content of phenolic compounds in *Sorbus aucuparia* fruits by nonstandard methods. *Food Systems*, 9(1), 25–31. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-25-31>

Антибактериальные свойства плодов рябины красной описаны в отношении *Enterococcus faecalis*, *E. coli* и *Pseudomonas aeruginosa*, которые способствуют антибактериальной защите клеток почек при их повреждении [7].

В работе [8] оценивалось антипролиферативное, противомикробное и антиоксидантное действие ацетоновых, этанольных и водных экстрактов из жмыха рябины. Экстракты, полученные из жмыха рябины, эффективно подавляли рост нежелательных микроорганизмов, особенно грамположительных бактерий. В целом результаты исследования свидетельствовали о том, что жмых рябины является перспективным источником натуральных соединений, обладающих антиоксидантной и биологической активностью.

1.2. Экстрагирование фенольных соединений

В настоящее время научные исследования рябины красной ведутся по нескольким ключевым направлениям; одним из них является формирование вкусо-ароматического букета продукта с функциональными свойствами, обеспечивающими его хранимоспособность за счет консервирующих свойств органических кислот растительного сырья [9].

В научной литературе установлено, что классификация природных фенольных соединений осуществляется на основе биогенетического принципа [10]. Данная классификация учитывает количество фенольных колец в структуре соединения и тип фрагментов, связывающих эти кольца. В результате выделяют пять основных классов [10]: 1) фенольные кислоты, представляющие собой производные бензойной и коричной кислот; 2) флавоноиды; 3) танины, которые подразделяются на гидролизуемые и конденсированные; 4) стильбены; 5) лигнаны. Все перечисленные классы относятся к вторичным метаболитам растительного происхождения. Кроме того, существует группа синтетических пространственно-затрудненных фенолов. Они находят применение в качестве стабилизаторов пищевых продуктов, а также растительных и технических масел с целью предотвращения окислительных процессов.

Определение мономерных фенольных соединений, в частности флавоноидов и кумаринов, а также антраценпроизводных соединений осуществляется с использованием неводных растворителей — диметилсульфоксида, ацетона и диметилформамида [11].

1.3. Методы обнаружения и количественного определения фенольных соединений

В научной литературе описано множество методов обнаружения фенольных соединений и типов растворителей-экстрагентов, что обусловлено разнообразием химической природы этих веществ. В работе [12] идентификацию флавоноидных соединений на примере травы кипрея узколистного проводили путем растворения сырья в 70 и 95%-ном этаноле с последующим добавлением хлороформа для исключения из смеси гидрофобных соединений.

Особенности физических свойств фенольных соединений проявляются в их способности растворяться в полярных растворителях; эту особенность многие авторы используют при разработке своих методов. Например, был создан метод и определены параметры количественного анализа суммы флавоноидов в цветках *Tripleurospermum inodorum flores* с пересчетом на рутин. Для анализа использовали дифференциальную спектрофотометрию при длине волны 410 нм и 70%-ный этанольный экстрагент [13].

Проведены исследования по определению оптимального экстрагента при разработке метода количественного определения суммы флавоноидов в цветках форзиции промежуточной *Forsythia intermedia zabel*, в качестве которого был выбран 30%-ный этанол. Ранее фармакологическими исследованиями установлено, что экстракт из цветков форзиции проявляет выраженное гепатопротекторное действие [14].

Для количественного определения суммы флавоноидов в лекарственном растительном сырье в качестве экстрагента также используют водно-этанольные растворы различной концентрации [15].

Фенольные соединения мономерной природы содержат небольшое количество гидроксильных групп, поэтому в качестве растворителей для их выделения применяют бензол, хлороформ, эфир, этилацетат и ацетон [16].

Для хроматографического анализа флавоноидов и гидроксикоричных кислот проводят этанольное извлечение из цветков сирени рода *Syringa (Oleaceae)* (70%-ный этанол, 1:30) [17].

В качестве реагентов для высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) чаще используют дистиллированную воду, метанол и ледяную уксусную кислоту; детектирование проводится при длинах волн 280, 303, 330 и 360 нм [18].

Химический состав экстрактов из плодов рябины красной определяется с помощью ультра-высокоэффективной жидкостной хроматографии с тандемным масс-спектрометрическим детектированием и спектрофотометрических методов. Основными фенольными соединениями были неохлорогеновая и хлорогеновая кислоты [8].

Применение газохроматографических методов, по сравнению с ВЭЖХ, требует дополнительной стадии пробоподготовки — дериватизации фенолов [19].

По данным литературы, при определении количественного и качественного содержания соединений фенольной природы в спектрофотометрическом анализе используют комплексы с солями металлов. В таком методе (в частности, в реакции взаимодействия с алюминием хлоридом) происходит bathochromный сдвиг при максимуме поглощения в области ультрафиолетовых волн.

Качественное обнаружение флавоноидов описано и в других публикациях реакциями: цианидиновой пробы, ацетатом свинца, с реактивом Вильсона [17].

Качественные и количественные методы включают применение тонкослойной хроматографии и УФ-спектрофотометрии. В статье [20] авторы определяли содержание флавоноидов в цветках, листьях и побегах боярышника в пересчете на гиперозид ($\lambda = 412$ нм), а для боярышника кроваво-красного и однопетистного — содержание суммы флавоноидов в пересчете на 2Р-О-рамнозида витексин ($\lambda = 392$ нм). В другом источнике [21] методом тонкослойной хроматографии авторами установлено наличие в траве фацелии пижмолистной фенолкарбоновых кислот (хлорогеновой, кофейной) и флавоноидов (рутина и кверцетина). При определении основных классов биологически активных веществ авторами использовались химические реакции, например, хроматография, спектроскопия в УФ-областях и ИК-областях спектра [22].

По мнению авторов, определение флаванолов возможно с помощью УФ-спектрокопии и флуориметрии. В качестве аналита, как правило, выступает гесперидин, реже — нарингенин. Представляет интерес подход к определению гесперицина в апельсиновых соках. Он основан на обработке образца специфическим ферментом гесперидин 6-О- α -L-рамнозил- β -D-глюкозидазой из грибов *Acremonium sp.* DSM 24697 с последующим УФ-детектированием образующегося гесперина при $\lambda = 323$ нм [23].

Анализ УФ-спектров также лежит в основе методов капиллярного электрофореза и ВЭЖХ [24,25] с диодно-матричным, флуориметрическим или масс-спектрометрическим детектированием.

Растительное сырье содержит сложный химический состав фенольных соединений, относящихся к различным классам органических веществ. Для их идентификации классически используют хроматографические методы. Для этого необходимо предварительное извлечение аналитов и их концентрирование. Поэтому применяют различные варианты жидкостной и твердофазной экстракции или их сочетание, что значительно увеличивает трудоемкость анализа и его стоимость [26].

За рубежом в последнее время уделяют внимание масс-спектрометрическому детектированию (МС), в том числе тандемному и высокому разрешению для повышения селективности и чувствительности определения [27].

По мнению авторов, метод ВЭЖХ позволяет определять группы флавоноидов [28]. При определении оптических изомеров флаванолов методом ВЭЖХ достигнуто хиральное разделение шести пар изомеров (флаванона, нарингенина, геспертина, эриодиктиола, ликвиритигенина и пиностромбина) на колонке Chiralpak AD-3R (2,1 × 150 мм, 3 мкм) с тройным квадрупольным тандемным масс-спектрометрическим детектированием в режиме мониторинга множества реакций [29].

Ультра-ВЭЖХ-МС позволяет одновременно определять 11 флаванолов в растительном сырье. Диапазоны количественного определения: эриодиктин, гесперидин, неогесперидин и эриодиктиол — 0,4–1000 нг/мл; ликвиритин — 0,4–300 нг/мл. Эти соединения были определены в образцах люцерны, золотарника, фацелии, гречихи, лакрицы и лаванды [30].

В исследованиях [17,31] полифенольные соединения также идентифицировали методом ВЭЖХ-МС.

В работе [32] для анализа антиоксидантов или определения антиоксидантной способности сложных образцов предложено использовать методы спектрофотометрии.

В фармакологии исследования растительного сырья с хлоридом алюминия спектрофотометрически описаны в работах других авторов [33–35]. Группой ученых подбирались оптимальные условия для экстрагирования фенольных соединений из растительного сырья, включая анализ для реакции комплексобразования с хлоридом алюминия [36].

В публикации [37] описана разработка экспресс-метода количественного определения действующих веществ в траве зверобоя. Метод основан на экстракции флавоноидов и последующем спектрофотометрическом определении комплекса рутина с хлоридом алюминия при длине волны $\lambda = 415$ нм.

В работе авторов [33] представлены исследования сиропов из лекарственно-растительных трав — душицы обыкновенной, чабреца и листьев мяты перечной, при которых использовали длину волны $\lambda = 410$ нм. Авторы [13] при разработке метода количественного определения суммы флавоноидов в цветках трехреберника непачучего проводили исследования при длине волны $\lambda = 410$ нм.

В публикации [15] описаны УФ-спектры экстрактов цветков липы с максимумом поглощения при длине волны $\lambda = 279$ нм. Проведен сравнительный анализ суммарного содержания флавоноидов в различных видах сырья боярышника кроваво-красного (*Crataegus sanguinea*) в пересчете на гиперозид [38]. По мнению авторов, для большинства исследуемых экстрактов в качестве стандарта может служить рутин, а определение содержания суммы биофлавоноидов в пересчете на рутин следует проводить в интервале длин волн 408–420 нм. Для экстрактов, имеющих максимум поглощения в области 421–435 нм, следует использовать в качестве стандарта кверцетин [35]. При исследовании цветков липы [15] экстрагентом выступал этанол с максимальным спектром поглощения на длине волны $\lambda = 408$ нм.

Авторами статьи [39] в качестве основы для разработки методики был использован метод, предполагающий спектрофотометрический анализ комплексов с реактивом Folin-Ciocalteu. Проведена сравнительная оценка содержания фенольных соединений, а также антиоксидантной и антирадикальной активности 70% водно-этанольного экстракта травы кровохлебки лекарственной (*Sanguisorba officinalis* L.), собранной в разные фазы развития [40]. В исследовании авторов [34] дана характеристика двадцати фенольных соединений, в том числе антиоксидантов в плодах, соке и выжимках сладкой рябины красной.

Количественное выражение полимерных фенольных соединений описывается как содержание рутина в работах [41–43].

Наличие фенольных фрагментов в структуре флаванонов является причиной электрохимической активности. Для их определения используют методы электроанализа. Результаты исследований выражаются в количественном определении гесперидина и нарингина в комплексах с рутин при использовании фосфатного буферного раствора (рН 11) — ацетонитрил (1:1) [44].

Существует мнение [45], что для структурно родственных фенольных антиоксидантов, как правило, не удается достичь электрохимического разрешения пиков или ступеней окисления при использовании традиционных углеродистых электродов. Дифференциально-импульсная вольтамперометрия на стеклогуглеродном электроде позволяет определять кверцетин и лютеолин при совместном присутствии.

Авторы статьи [46] для одновременного определения содержания хлорогеновых кислот и ванилина в присутствии кофеина предложили использовать квадратно-волновую адсорбционную инверсионную вольтамперометрию, что позволило установить потенциалы окисления для хлорогеновой кислоты и ванилина — 0,68. Предложенный метод характеризуется широким диапазоном определяемых концентраций (2,8–170 мкМ для хлорогеновых кислот и 3,3–330 мкМ для ванилина), а также низкими пределами обнаружения (0,40 мкМ для ClO₄⁻ и 0,38 мкМ для ванилина). Эффективность метода была подтверждена при анализе образцов растворимого кофе с ванилью.

Сенсоры на основе углеродных наноматериалов различных типов [47] дают возможность одновременно определять природные фенольные антиоксиданты: фенольные кислоты, ароматические альдегиды, ванилин и гваякол, флавоноиды. Было разработано несколько вольтамперометрических сенсоров, основой которых служит оксид графена, восстановленный с помощью боргидрида натрия, гидразина или сероводорода [48].

Угольно-пастовый электрод с включенными наночастицами Fe₃O₄ предложен авторами для одновременного определения синаповой, сиреневой кислот и рутина [49].

Авторами [50] разработаны чувствительные и селективные сенсоры на основе полифурфурала для одновременного определения природных фенольных антиоксидантов.

Также успешно применяется при анализе растительного сырья метод капиллярного электрофореза [51,52]. Зонный капиллярный электрофорез с различными типами детектирования дает возможность проводить одновременное определение флаванонов в компонентах растительного происхождения, в том числе в присутствии фенольных соединений других классов.

В настоящем исследовании проведен анализ нормативной базы, регламентирующей оценку биологически активных веществ фенольной природы, а также научно-технических публикаций последних лет по данной тематике. На основании полученных данных обоснован выбор методов определения фенольных соединений, наиболее часто применяемых и демонстрирующих наилучшие результаты при исследовании растительного сырья. Цель работы — обоснование и выбор метода количественного определения фенольных соединений в плодах рябины красной.

2. Объекты и методы

2.1. Объекты исследований

В ходе проведения исследований количественного содержания веществ фенольной природы использовали плоды *Sorbus Aucuparia* (далее — рябины красной), собранные в Новосибирской области (период сбора — 2022 год):

□ образец № 1 (обезвоженный образец) — технологическая обработка основана на принципах сушки сырья для дальнейшего хранения. Параметры дегидратации плодов проводились по принципу конвективной сушки в температурных режимах $60 \pm 2,0$ °C при 100% конвекции. В конце процесса обезвоживания содержание влаги в сырье было на уровне $7,0 \pm 1,0$ %.

□ образец № 2 (замороженный образец) — технологическая обработка и хранение основаны на принципах низкотемпературной обработки при температуре (-18 ± 2) °C, влажности 75–80%.

Исследование образцов № 1 и № 2 на содержание влаги проводили по ГОСТ 24027.2–80¹.

Отбор проб проводился по ГОСТ 24027.0–80²; для исследования были отобраны по 3 образца обезвоженных и замороженных плодов рябины.

2.1. Методы исследований

2.1.1. Метод 1 — экстракция и последующее колориметрическое определение на длине волны 400 нм

Содержание мономерных фенольных соединений, в частности флавоноидного ряда, определяли по ГОСТ 28887–2019³ (п. 6.13). Метод выбран в связи с простотой выполнения и возможностью оценки его применимости для выделения фенольных соединений из плодов рябины с последующим спектрофотометрическим определением. Сущность метода: отбор пробы плодов рябины массой $0,20 \pm 0,001$ г с дальнейшей экстракцией в присутствии 4 см³ дистиллированной воды и 20 см³ ацетона (исследование 1) или 95%-го этанола (исследование 2) при температуре $(20,0 \pm 2,0)$ °C в течение 60 минут в отсутствие светового воздействия. Далее проводили фильтрацию через бумажный фильтр («синяя лента») и определяли оптическую плотность при длине волны $\lambda = 400$ нм на фотоэлектрическом колориметре КФК-2 (ЗОМ, Россия). В качестве раствора сравнения применяли дистиллированную воду.

Содержание массовой доли мономерных фенольных соединений (в частности флавоноидного ряда) в образцах плодов рябины (мг) рассчитывали по формуле (1):

$$X = \frac{D \times 24}{m \times 8,37} \times \frac{100}{(100 - W)}, \quad (1)$$

где: D — количественная единица оптической плотности образца, е.д.; 24 — количественный объем пробоподготовки, см³; m — масса пробы рябины, г; 8,37 — коэффициент пересчета оптической плотности; W — содержание влаги в плодах, %.

2.1.2. Метод 2 — колориметрическое определение при длине волны 400 нм с построением градуировки по рутину

Анализ количественного содержания фенольных соединений (%) проводили с построением градуировочной шкалы по рутину. Сущность метода заключалась в отборе пробы плодов рябины с последующим экстрагированием 40%-м этанолом объемом 30 см³. Процесс экстрагирования проводился при использовании обратного холодильника при температуре $(60,0 \pm 2,0)$ °C в течение 60 минут. Следующим этапом была фильтрация через бумажные фильтры («синяя лента») полученных экстракционных извлечений пробы в мерную колбу вместимостью 100 см³. Процесс экстракции

¹ ГОСТ 24027.2–80 «Сырье лекарственное растительное. Методы определения влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирного масла». М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. — 10 с.

² ГОСТ 24027.0–80 «Сырье лекарственное растительное. Правила приемки и методы отбора проб». М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. — 5 с.

³ ГОСТ 28887–2019 «Пыльцевая обложка. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2019. — 16 с.

повторяли дополнительно два раза, после чего доводили общий объем до метки 40%-м этанолом (раствор А).

Сущность исследования заключалась в следующем: в мерную колбу вместимостью 25 см³ вносили 1 см³ раствора А, добавляли 1 см³ 2%-го хлорида алюминия и доводили объем до метки 95%-м этанолом. Метод предусматривал подготовку раствора сравнения — смешивание в мерной колбе вместимостью 25 см³ раствора А объемом 1 см³ и 0,2 см³ уксусной кислоты ледяной с дальнейшим доведением до метки 95%-м этанолом. Пробы оставляют на 40 мин в защищенном от света помещении. Далее определяли оптическую плотность при длине волны λ=400 нм на колориметре фотоэлектрическом КФК-2 (ЗОМ, Россия).

Количественное содержание фенольных соединений (%) в плодах рябины в пересчете на рутин проводили согласно формуле (2) [36]:

$$X = \frac{D \times V_1 \times V_2 \times 1,1}{248 \times m \times (100 - W)} \times 100, \quad (2)$$

где: D — количественная единица оптической плотности образца, е.д.; 248 — удельный показатель пересчета при поглощении рутина в присутствии алюминия хлорида; V — объем раствора А, см³; m — масса пробы плодов рябины, г; 1,1 — поправочный коэффициент на неполноту экстракции фенольных соединений; W — содержание влаги в плодах, %; V_1 — объем колбы для экстракционных извлечений (100 см³); V_2 — объем колбы при пробоподготовке к исследованиям (25 см³).

2.1.3. Метод 3 — экстракция этанолом и последующее колориметрическое определение на длине волны 590 нм

Фотоэлектродиметрическое определение массовой концентрации полифенолов проводили по ГОСТ 34798-2021⁴. Анализ экстракта (на основе 40%-ного этанола) из плодов рябины обусловлен применимостью разных методов для оценки фенольных соединений. Подготовка пробы заключалась в смешивании 10 см³ экстракционного извлечения раствора А (по методу 2), 8 см³ раствора карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) и 0,5 см³ раствора лимонно-аммиачного железа (III), с последующим доведением объема дистиллированной водой до метки мерной колбы (25 см³ в нашем исследовании) и перемешиванием содержимого до получения однородной смеси. Затем колбу с пробой выдерживали при температуре (20±5)°С в течение 10 мин. Подготовка раствора сравнения проводилась аналогично пробоподготовке образца, с заменой 0,5 см³ раствора лимонно-аммиачного железа (III) на 0,5 см³ раствора аммиака. Подготовленные пробы при температуре (20±5)°С выдерживали в течение 10 мин и определяли оптическую плотность при длине волны λ=590 нм на колориметре фотоэлектрическом КФК-2 (ЗОМ, Россия).

Содержание массовой доли полифенольных соединений в плодах рябины (мг/дм³) вычисляли по формуле (3):

$$X = D \times K, \quad (3)$$

где: D — количественная единица оптической плотности образца, е.д.; K — коэффициент пересчета ($K=820$).

2.1.4. Метод 4 — перманганатометрия

Количественное определение фенольных соединений в плодах рябины проводили окислительно-восстановительным титрованием (перманганатометрией). Выражение результата титрования приводили в пересчете на содержание рутина в образцах. Пробоподготовка заключается в экстрагировании, в качестве растворителя использовали дистиллированную воду температурой (98,0±2,0)°С в количестве 50 см³, продолжительность этапа составляла 5 мин. Процесс титрования заключался в подготовке экстрагированного извлечения в объеме 10 см³, 10 см³ дистиллированной воды, 6 капель индикатора индигокармина в колбу для титрования. В качестве титранта использовали раствор перманганата калия в концентрации 0,05 н, процесс титрования считался окончанным до фиксации устойчивой желтой окраски. Содержание массовой доли фенольных соединений в плодах рябины по рутину (%) находили по формуле (4):

$$w = \frac{3,2 \times V_{p-pa} \times V_k}{1000 \times m \times V_n} \times 100\%, \quad (4)$$

где: 3,2 — масса рутина (мг), необходимого для окисления в процессе титрования; V_{p-pa} — объем израсходованного титранта, см³; V_k — объем экстрагированной пробы (50 см³); V_n — объем экстракционного извлечения (10 см³); m — масса пробы плодов рябины, г.

Обработка результатов количественного анализа фенольных соединений плодов рябины проводили с использованием статистических методов обработки данных в условиях трех параллельных определений.

⁴ ГОСТ 34798-2021 «Продукция пивоваренная. Идентификация. Фотоэлектродиметрический метод определения массовой концентрации полифенолов». М.: Российский институт стандартизации, 2021. — 11 с

Обработку данных проводили с применением регрессионного анализа программы MS Excel, при проверке адекватности полученных данных использован F-критерий Фишера, при расчете значимости коэффициентов — t-критерий Стьюдента.

3. Результаты и обсуждение

При выборе растворителя для экстракции традиционно рекомендуется учитывать природу экстрагируемого вещества (тип растения, части растения) [18,19].

За основу метода 1 был взят метод, разработанный для пыльцевой обножки. В качестве экстрагента был выбран ацетон, что объясняется химической природой соединения, так как ацетон не вступает в химическое взаимодействие с экстрагируемым веществом. Образцы плодов рябины в замороженном виде подвергались экстракции в присутствии ацетона примерно в 1,8 раза эффективнее по сравнению с обезвоженными плодами.

Зависимости содержания фенольных соединений от измеряемой оптической плотности в образцах плодов рябины, а также полученные значения представлены в Таблицах 1 и 2 (фенольных соединений, мг/100 г — в Таблице 1; флавоноидов, % — в Таблице 2).

Для сравнения двух экстрагентов по методу 1 замена ацетона 95%-ным этанолом при извлечении флавоноидных соединений имела более низкие средние значения, чем при использовании по аналогичному методу 1 с применением ацетона (исследование 1). При исследовании содержания флавоноидов раствор для извлечения должен находиться в условиях кислой среды pH 2–4 е.д., т.к. при извлечении возможен переход полисахаридных комплексов. Одним из решений этой проблемы предлагается исследование экстрактов, полученных при извлечении путем осаждения 95%-ным этанолом. В Таблице 1 отображены зависимости по содержанию фенольных соединений от измеряемой оптической плотности в образцах плодов рябины с применением метода 2. Содержание фенольных соединений было примерно в 1,5 раза выше в замороженных плодах рябины по сравнению с обезвоженными, что подтверждалось разницей между объектами исследования в 0,080%.

Таблица 1. Сравнительная характеристика результатов разных методов количественного определения фенольных соединений ($p=0,95, n=3$)

Table 1. Comparative characteristics of the results of different methods for quantification of phenolic compounds ($p=0.95, n=3$)

Для обезвоженных плодов		Для замороженных плодов	
анализ зависимых факторов	$X_{cp} \pm \Delta X_{cp}^*$	анализ зависимых факторов	$X_{cp} \pm \Delta X_{cp}^*$
Метод 1 колориметрическое определение на длине волны 400 нм (с экстракцией ацетоном)			
$Y = 2,88 - 1,14x$ $R = 0,76; F = 0,34$	$1,74 \pm 0,01$	$Y = -0,18 + 3,53x$ $R = 0,90; F = 0,20$	$3,11 \pm 0,03$
Метод 1 колориметрическое определение на длине волны 400 нм (с экстракцией 95% этанолом)			
$Y = 2,83 - 1,47x$ $R = 0,86; F = 0,244$	$1,39 \pm 0,004$	$Y = 1,64 + 0,46x$ $R = 0,70; F = 0,330$	$2,05 \pm 0,007$
Метод 3 колориметрическое определение на длине волны 590 нм (с экстракцией 40% этанолом)			
$Y = 3,50 + 3,06x$ $R = 0,70; F = 0,36$	$5,61 \pm 0,04$	$Y = -2,11 + 17,39x$ $R = 0,95; F = 0,15$	$9,25 \pm 0,06$

* Примечание: $\pm \Delta X_{cp}$ — расхождение между параллельными измерениями $p=0,95$.

Метод 3, согласно стандарту и проведенному литературному обзору, применим для производства продукции с содержанием этанола. Концентрация обнаруженных полифенолов была выше в замороженных плодах рябины по сравнению с обезвоженными.

Метод 2 основан на количественном определении фенольных соединений посредством использования дифференциальной спектрофотометрии в сочетании реакции с комплексом алюминия хлорида; был разработан для гортензии древовидной. Его выбор объясняется устойчивостью комплекса химических соединений и доступностью при измерении и обработке данных. Процесс определения флавоноидов в плодах рябины по методу 2 имел наименьшие показатели средних значений. При сравнении с методом 1 результаты по содержанию флавоноидов были меньше, однако этот факт можно объяснить определением только рутина из всех флавоноидных соединений.

При сравнении метода 2 (с использованием алюминия хлорида) с литературными данными авторов содержание флавоноидов составило 0,49–1,24% [53].

Исследования фенольных соединений по методу 4, основанному на методе окислительно-восстановительного титрования, проводятся на плодах рябины красной в замороженном и обезвоженном виде. Содержание фенольных соединений в образце № 2 (замороженные плоды) в 1,3 раза больше в сравнении с обезвоженными образцами. Перманганатометрия при сравнении данных образцов по средним значениям (X_{cp}) (Таблица 1) различны не более чем на 20%.

Наиболее доступным методом для определения фенольных соединений был метод 4, не требующий дополнительного оборудования для проведения количественных измерений и применяемый на плодах рябины красной. Опираясь на полученные количественные данные, можно судить об обнаружении фенольных соединений различной природы: метод 1 направлен на исследование общего содержания фенольных соединений, методы 2 и 4 — на пересчет по рутину, метод 3 — на выделение полифенолов. Используемые методы имели ошибку не более 1%. В сравнении с высокоэффективной жидкостной хроматографией методы 1 и 3 указывали на общее содержание фенольных соединений. Они являются нестандартными и возможны для применения после дополнительных исследований и разработки на их основе новых методов количественного анализа фенольных соединений.

Таблица 2. Сравнительная характеристика результатов разных методов количественного определения фенольных соединений по рутину ($p=0,95$, $n=3$)

Table 2. Comparative characteristics of the results of different methods for quantification of phenolic compounds in terms of rutin ($p=0.95$, $n=3$)

Метод 2 колориметрический при длине волны 400 нм с построением градуировки по рутину			
анализ зависимых факторов	$X_{cp} \pm \Delta X_{cp}^*$	анализ зависимых факторов	$X_{cp} \pm \Delta X_{cp}^*$
$Y = -0,03 + 1,29x$ $R=0,98; F=0,09$	$0,03 \pm 0,002$	$Y = -0,09 + 3,12x$ $R=0,75; F=0,32$	$0,04 \pm 0,005$
Метод 4. Перманганатометрия			
$Y = 1,35 + 0,03x$ $R=0,92; F=0,16$	$1,38 \pm 0,06$	$Y = 1,66 + 0,5x$ $R=0,95; F=0,15$	$1,66 \pm 0,02$

* Примечание: $\pm \Delta X_{cp}$ — расхождение между параллельными измерениями $p=0,95$.

По данным авторов, содержание фенольных соединений плодов рябины зависит от биологических особенностей сорта или вида, а также от климатических условий в конкретный год заготовки сырья. Например, рябина сорта *Sorbus sibirica* превосходила сорт *Sorbus aucuparia* на 12,8% [17,53].

4. Выводы

Приведены данные о количественном содержании фенольных соединений в плодах рябины с применением разных методов. Не все применяемые методы имели соответствующую анализу плодового сырья область применения. Используемые методы не применялись ранее для анализа плодового сырья, в частности плодов рябины. В ходе исследования определены наиболее оптимальные экстрагенты для выделения фенольных соединений.

Из используемых методов установлено, что для обезвоженных и замороженных плодов рябины в качестве экстрагента подходят ацетон и 95%-ный этанол (метод 1), а также 40%-ный этанол (метод 3). Наибольшее выделение фенольных соединений наблюдалось при использовании метода 3 и составило 5,61 мг/100 г для обезвоженных плодов и 9,25 мг/100 г для замороженных плодов.

При сравнении числовых данных отмечено, что выход фенольных соединений наиболее выражен при исследовании замороженных плодов рябины. Данный факт можно объяснить разрушением клеточной структуры растительной ткани при воздействии низких температур. Обезвоженные плоды рябины подвергались восстановлению клеточной структуры, что, возможно, потребовало увеличения времени экстракции данного вида сырья.

Также можно предположить частичное разрушение фенольных соединений в процессе конвективной сушки, вызванное высокими температурами и изменением осмотического давления.

Использование представленных методов анализа фенольных соединений позволило получить новые данные о применимости различных методов для оценки обезвоженных и замороженных плодов рябины. Полученные результаты количественного анализа распространяются на данные образцы растительного сырья при условии соблюдения всех параметров проведения исследований по приведенным в статье методам. Представленный научный материал может служить теоретической базой для формирования показателей безопасности растительного сырья по содержанию фенольных соединений и разработки соответствующих методов контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Варданян, Л. Р., Арутюнян, С. А., Торосян, Г. О. (2025). Исследование антиоксидантной активности растительного сырья как натурального стабилизатора пищевых продуктов. *Техника и технология пищевых производств*, 55(3), 485–495. [Vardanyan, L. R., Arutyunyan, S. H., Torosyan, G. H. (2025). Antioxidant activity of plant raw materials as natural food stabilizers. *Food Processing: Techniques and Technology*, 55(3), 485–495. (In Russian)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2586>
- Arvinte, O. M., Senila, L., Becze, A., Amariei, S. (2023). Rowanberry — A source of bioactive compounds and their biopharmaceutical properties. *Plants*, 12(18), Article 3225. <https://doi.org/10.3390/plants12183225>
- Zymone, K., Raudone, L., Zvikas, V., Jakštas, V., Janulis, V. (2022). Phytoprofilung of *Sorbus L.* inflorescences: A valuable and promising resource for phenolics. *Plants*, 11(24), Article 3421. <https://doi.org/10.3390/plants11243421>
- Sarv, V., Venskutonis, P. R., Bhat, R. (2020). The *Sorbus* spp. — Underutilised plants for foods and nutraceuticals: Review on polyphenolic phytochemicals and antioxidant potential. *Antioxidants*, 9(9), Article 813. <https://doi.org/10.3390/antiox9090813>
- Rajendran, P., Abdelsalam, S. A., Renu, K., Veeraraghavan, V., Ben Ammar, R., Ahmed, E. A. (2022). Polyphenols as potent epigenetics agents for cancer. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19), Article 11712. <https://doi.org/10.3390/ijms231911712>
- Lee, S. Y., Park, S.-Y., Lee, G.-E., Kim, H., Kwon, J.-H., Kim, M. J. et al. (2021). Aucuparin suppresses bleomycin-induced pulmonary fibrosis via anti-inflammatory activity. *Journal of Medicinal Food*, 24(2), 151–160. <https://doi.org/10.1089/jmf.2020.4861>
- Aurori, M., Niculae, M., Hanganu, D., Pall, E., Cenariu, M., Vodnar, D. C. et al. (2024). The antioxidant, antibacterial and cell-protective properties of bioactive compounds extracted from rowanberry (*Sorbus aucuparia L.*) fruits *in vitro*. *Plants*, 13(4), Article 538. <https://doi.org/10.3390/plants13040538>
- Bobinaite, R., Grootaert, C., Van Camp, J., Sarkinas, A., Liaudanskas, M., Žvikas, V. et al. (2020). Chemical composition, antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of the extracts isolated from the pomace of rowanberry (*Sorbus aucuparia L.*). *Food Research International*, 136, Article 109310. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109310>
- Hwang, H.-J., Kim, P., Kim, C.-J., Lee, H.-J., Shim, I., Yin, C. S. et al. (2008). Antinociceptive effect of amygdalin isolated from *Prunus armeniaca* on formalin-induced pain in rats. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 31(8), 1559–1564. <https://doi.org/10.1248/bpb.31.1559>
- Ziyatdinova, G. K., Zhupanova, A. S., Budnikov, H. C. (2022). Electrochemical sensors for the simultaneous detection of phenolic antioxidants. *Journal of Analytical Chemistry*, 77(2), 155–172. <https://doi.org/10.1134/S1061934822020125>
- Марахова, А. И. (2015). Методологические аспекты разработки методик количественного анализа при стандартизации лекарственного растительного сырья. *Успехи современного естествознания*, 11, 58–61. [Marakhova, A. I. (2015). Methodological aspects of development of techniques of quantitative analysis in the standardization of medicinal plants. *Advances in Current Natural Sciences*, 11, 58–61. (In Russian)]
- Бояринцев, Д. И., Кузьминов, И. В., Брютова, К. В., Русакова, О. А. (2024). Стандартизация сырья, полученного из надземных органов кипрея узколистного (*Chamaenerion angustifolium L.*). *Химия растительного сырья*, 3, 177–187. [Boyarintsev, D. I., Kuz'minov, I. V., Bryutova, K. V., Rusakova, O. A. (2024). Standardization of raw materials obtained from aerial organs of natural fire-broad (*Chamaenerion angustifolium L.*). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 3, 177–187. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcpr.20240312495>
- Блинова, О. Л., Гилева, А. А., Хлебников, А. В., Белоногова, В. Д., Турышев, А. Ю. (2021). Разработка методики количественного определения суммы флавоноидов в трехребернике непахучем цветках. *Медико-фармацевтический журнал Пульс*, 23(6), 157–166. [Blinova, O. L., Gileva, A. A., Hlebnikov, A. V., Belonogova, V. D., Turyshev, A. Y. (2021). Development of a method for quantitative determination of the amount of flavonoids in tripleurospermum inodorum's flowers. *Medical and Pharmaceutical Journal Pulse*, 23(6), 157–166. (In Russian)] <https://doi.org/10.26787/mydha-2686-6838-2021-23-6-157-166>
- Леонова, В. Н., Попова, О. И., Красовская, А. В. (2016). Разработка и валидация методики количественного определения флавоноидов в цветках форзиции промежуточной *Forsythia intermedia zabel*. *Химия растительного сырья*, 4, 117–122. [Leonova, V. N., Popova, O. I., Krasovskaya, A. V. (2016). Development and validation of methods of quantitative determination of flavonoids in the flowers of forsythia intermediate (*Forsythia intermedia zabel*). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 4, 117–122. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcpr.2016041341>
- Гаврилова, Н. А., Шурыгина, М. С., Курдюков, Е. Е., Водопьянова, О. А., Кривов, Д. В. (2020). Новая методика количественного определения флавоноидов в цветках липы. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки*, 2(30), 5–13. [Gavrilova, N. A., Shurygina, M. S., Kurdyukov, E. E., Vodop'yanova, O. A., Krivov, D. V. (2020). A new method of quantitative

- determination of flavonoids in linden flowers. *A University Proceedings. Volga Region. Natural Sciences*, 2(30), 5–13. (In Russian) <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2020-2-1>
16. Orsavová, J., Juríková, T., Bednaříková, R., Mlček, J. (2023). Total phenolic and total flavonoid content, individual phenolic compounds and antioxidant activity in sweet rowanberry cultivars. *Antioxidants*, 12(4), Article 913. <https://doi.org/10.3390/antiox12040913>
 17. Пупыкина, К. А., Полякова, Н. В., Кудашкина, Н. В., Красюк, Е. В. (2023). Сравнительный анализ компонентного состава цветков некоторых представителей рода *Syringa* (Oleaceae). *Растительные ресурсы*, 59(2), 152–163. [Pupykina, K. A., Polyakova, N. V., Kudashkina, N. V., Krasnyuk, E. V. (2023). Comparative analysis of the component composition of flowers in some species of the genus *Syringa* (Oleaceae). *Vegetation Resources*, 59(2), 152–163. (In Russian)] <https://doi.org/10.31857/S00353994623020103>
 18. Каримова, Н. Ю., Алексеевко, Е. В., Цветкова, А. А., Бакуменко, О. Е. (2023). Сравнительная биохимическая характеристика ягод лесной и садовой черники как обоснование для применения в качестве источника функциональных пищевых ингредиентов. *Химия растительного сырья*, 4, 199–208. [Karimova, N. Yu., Alekseenko, E. V., Tsvetkova, A. A., Bakumenko, O. E. (2023). Comparative biochemical characteristics of forest and garden bilberries as a rationale for use as a source of functional ingredients. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 4, 199–208. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230412171>
 19. Груздев, И. В., Вебер, Н. Э., Скромца, О. В. (2024). Выделение и определение фенольных кислот в плодах рябины (*Sorbus L.*) методом газовой хроматографии. *Аналитика и контроль*, 28(2), 87–97. [Gruzdev, I. V., Veber, N. E., Skrotskaya, O. V. (2024). Isolation and determination of phenolic acids in rowanberry fruits (*Sorbus L.*) by gas chromatography. *Analytics and Control*, 28(2), 87–97. (In Russian)] <https://doi.org/10.15826/analitika.2024.28.2.002>
 20. Куркина, А. В. (2014). Определение содержания суммы флавоноидов в плодах боярышника. *Химико-фармацевтический журнал*, 48(12), 27–30. [Kurkina, A. V. (2014). Determination of total flavonoids in hawthorn fruits. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 48(12), 27–30. (In Russian)] <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2014-48-12-27-30>
 21. Шейхмагомедова, П. А., Попова, О. И. (2022). Идентификация фенольных соединений и разработка методики количественного определения суммы фенолкарбоновых кислот в траве фацелии пижмолистной (*Phacelia tanacetifolia* Benth.). *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*, 25(12), 44–50. [Sheykhmagomedova, P. A., Popova, O. I. (2022). Identification of phenolic compounds and development of a method for quantitative determination of the amount of phenolcarboxylic acids in the herb of *Phacelia tanacetifolia* Benth. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 25(12), 44–50. (In Russian)] <https://doi.org/10.29296/25877313-2022-12-07>
 22. Шилова, И. В., Барановская, Н. В., Суслов, Н. И., Минакова, М. Ю. (2024). Биологически активные вещества и элементный состав побегов *Vaccinium myrtillus* после сбора плодов (на примере Томской области). *Химия растительного сырья*, 4, 179–189. [Shilova, I. V., Baranovskaya, N. V., Suslov, N. I., Minakova, M. Yu. (2024). Biologically active substances of *Vaccinium Myrtillus* shoots after harvesting fruit (on the example of the Tomsk region). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 4, 179–189. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240412761>
 23. Jha, D. K., Shah, D. S., Talele, S. R., Amin, P. D. (2020). Correlation of two validated methods for the quantification of naringenin in its solid dispersion: HPLC and UV spectrophotometric methods. *SN Applied Sciences*, 2(4), Article 698. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2536-3>
 24. Шамилов, А. А., Бубенчикова, В. Н., Гарсия, Е. Р., Ибаева, Х. А., Ларский, М. В. (2022). Разработка и валидация методики количественного определения фенольных соединений и хлорогеновой кислоты в голубики болотной листвы. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*, 25(2), 14–23. [Shamilov, A. A., Bubenchikova, V. N., Garcia, E. R., Ibaeva, H. A., Larsky, M. V. (2022). Investigation and validation of quantitative analysis of phenolic compounds and chlorogenic acid in the vaccinium uliginosum leaves. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 25(2), 14–23. (In Russian)] <https://doi.org/10.29296/25877313-2022-02-03>
 25. Sadeer, N. B., Montesano, D., Albrizio, S., Zengin, G., Mahomoodally, M. F. (2020). The versatility of antioxidant assays in food science and safety — Chemistry, applications, strengths, and limitations. *Antioxidants*, 9, Article 709. <https://doi.org/10.3390/antiox9080709>
 26. Hejniak, J., Baranowska, I., Stencel, S., Bajkacz, S. (2019). Separation and determination of selected polyphenols from medicinal plants. *Journal of Chromatographic Science*, 57(1), 17–26. <https://doi.org/10.1093/chromsci/bmy075>
 27. Seo, C.-S., Shin, H.-K. (2022). Simultaneous analysis for quality control of traditional herbal medicine, gungha-tang, using liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Molecules*, 27(4), Article 1223. <https://doi.org/10.3390/molecules27041223>
 28. Zheng, H., Zhen, X.-T., Chena, Y., Zhua, S.-C., Ye, L.-H., Yang, S.-W. et al. (2021). In situ antioxidant-assisted matrix solid-phase dispersion microextraction and discrimination of chiral flavonoids from citrus fruit via ion mobility quadrupole time-of-flight high-resolution mass spectrometry. *Food Chemistry*, 343, Article 128422. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128422>
 29. Baranowska, I., Hejniak, J., Magiera, S. (2017). LC-ESIMS/MS method for the enantioseparation of six flavanones. *Analytical Methods*, 9(6), 101–1030. <https://doi.org/10.1039/C6AY02952C>
 30. Bajkacz, S., Baranowska, I., Buszewski, B., Kowalski, B., Ligor, M. (2018). Determination of flavonoids and phenolic acids in plant materials using SLE-SPE-UHPLCMS/MS method. *Food Analytical Methods*, 11(12), 3563–3575. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1332-9>
 31. Гусакова, Г. С., Супрун, Н. П., Раченко, М. А., Чеснокова, А. Н., Чупарина, Е. В. Немчинова, А. И. и др. (2019). Исследование биохимического состава плодов яблони Южного Прибайкалья и продуктов виноделия, сброженных на древесной щепе. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*, 9(4), 722–736. [Gusakova, G. S., Suprun, N. P., Rachenko, M. A., Chesnokova, A. N., Chuparina, E. V., Nemchinova, A. I. et al. (2019). Study of the biochemical composition of fruits of the Southern Baikal apple tree and its wine products fermented on wood chip. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 9(4), 722–736. (In Russian)] <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-722-736>
 32. Munteanu, I. G., Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 7(22), Article 3380. <https://doi.org/10.3390/ijms22073380>
 33. Хисматуллина, Д. И., Нигматьянов, А. А. (2017). Содержание флавоноидов в растительном сырье и их сохранность после термической обработки. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 5(67), 222–224. [Khismatullina, D. I., Nigmatyanov, A. A. (2017). The content of flavonoids in vegetal raw stuff and their preservation after thermal treatment. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 5(67), 222–224. (In Russian)]
 34. Sarv, V., Venskutonis, P. R., Rätsep, R., Aluvee, A., Kazernavičiūtė, R., Bhat, R. et al. (2021). Antioxidants characterization of the fruit, juice, and pomace of sweet rowanberry (*Sorbus aucuparia L.*) cultivated in Estonia. *Antioxidants*, 10(11), Article 1779. <https://doi.org/10.3390/antiox10111779>
 35. Лобанова, А. А., Будаева, В. В., Сакович, Г. В. (2004). Исследование биологически активных флавоноидов в экстрактах из растительного сырья. *Химия растительного сырья*, 1, 47–52. [Lobanova, A. A., Budaeva, V. V., Sakovich, G. V. (2004). Study of biologically active flavonoids in extracts from plant raw materials. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 1, 47–52. (In Russian)]
 36. Мурзабулатова, Ф. К., Пупыкина, К. А., Красюк, Е. В., Полякова, Н. В., Шигапов, З. Х. (2023). Анатомическое строение и фитохимический анализ листа, стебля и корня гортензии древовидной (*Hydrangea Arborescens L.*). *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*, 3, 269–277. [Murzabulatoeva, F. K., Pupykina, K. A., Krasnyuk, E. V., Polyakova, N. V., Shigarov, Z. Kh. (2023). Anatomical structure and phytochemical analysis of the leaf, stem and root of hydrangea tree (*Hydrangea arborescens L.*). *Biology Bulletin*, 3, 269–277. (In Russian)] <https://doi.org/10.31857/S10265470230700130>
 37. Хазиев, Р. Ш., Петрова, Д. Н., Габдрахманова, М. Н., Ситенков, А. Ю. (2015). Новые подходы к стандартизации травы зверобоя. *Традиционная медицина*, 2(41), 25–28. [Khaziev, R.Sh., Petrova, D.N., Gabdrakhmanova, M.N., Sitnikov, A. Y. (2015). New approaches to standardization of herb of *Hypericum*. *Traditional Medicine*, 2(41), 25–28. (In Russian)]
 38. Михайлова, И. В., Кузьмичева, Н. А., Иванова, Е. В., Воронкова, И. П., Филиппова, Ю. В., Шостак, Е. И. и др. (2019). Сравнительный анализ суммарного содержания флавоноидов в различных видах сырья боярышника кроваво-красного (*Crataegus sanguinea*). *Оренбургский медицинский вестник*, VII(2(26)), 48–51. [Mikhailova, I. V., Kuzmicheva, N. A., Ivanova, E. V., Voronkova, I. P., Filipirova, Y. V., Shostak, E. I. et al. (2019). Comparative analysis of the total content of flavonoids in different types of blood and red table of raw material (*Crataegus sanguinea*). *Orenburg Medica Herald*, VII(2(26)), 48–51. (In Russian)]
 39. Скрыпник, Л. Н., Мельничук, И. П., Королева, Ю. В. (2020). Пищевая и биологическая ценность плодов боярышника *Crataegus oxyacantha L.* Химия растительного сырья, 1, 265–275. [Skrypnik, L. N., Melnichuk, I. P., Koroleva, Yu. V. (2020). Nutritional and biological value of fruits of *Crataegus oxyacantha L.* *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 1, 265–275. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020015452>
 40. Мальцева, Е. М., Егорова, Н. О., Егорова, И. Н., Мухамадияров, Р. А. (2017). Антиоксидантная и антирадикальная активность in vitro экстрактов травы *Sanguisorba Officialis L.*, собранной в различные фазы развития. *Медицина в Кузбассе*, 16(2), 32–38. [Malceva, E. M., Egorova, N. O., Egorova, I. N., Mukhamadiyarov, R. A. (2017). Antioxidant and antiradical activity in vitro of herb extracts of *Sanguisorba Officialis L.*, gathered in various development stages. *Medicine in Kuzbass*, 16(2), 32–38. (In Russian)]
 41. Щербаклова, Л. В., Тихомирова, Л. И., Карпицкий, Д. А., Мартиросян, Ю. Ц., Ескалиева, Б. К. (2019). Особенности накопления флавоноидов в биотехнологическом сырье *Iris sibirica L.* и разработка методики их количественного определения. *Химия растительного сырья*, 4, 327–336. [Shcherbakova, L. V., Tikhomirova, L. I., Karpitsky, D. A., Martirosyan, Yu. Ts., Eskalieva, B. K. (2019). The features of the accumulation of flavonoids in biotechnological raw material of *Iris sibirica L.* the development of methods of quantification. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 4, 327–336. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019046095>
 42. Тихомирова, Л. И., Базарнова, Н. Г., Сысоева, А. В., Щербаклова, Л. В. (2018). Фитохимический анализ биотехнологического сырья представителей рода *Potentilla L.* *Химия растительного сырья*, 1, 145–154. [Tikhomirova, L. I., Bazarnova, N.G., Sysoeva, A. V., Shcherbakova, L. V. (2018). Phytochemical analysis of biotechnological raw materials of representatives of the genus *Potentilla L.* *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 1, 145–154. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018012734>
 43. Тихомирова, Л. И., Базарнова, Н. Г., Ильичева, Т. Н., Мартиросян, Ю. Ц., Афанасенкова, И. В. (2018). Получение растительного сырья ириса сибирского (*Iris sibirica L.*) методами биотехнологии. *Химия растительного сырья*, 4, 235–245. [Tikhomirova, L. I., Bazarnova, N. G., Ilyicheva, T. N., Martirosyan, Yu. Ts., Afanasevskaya, I. V. (2018). Obtaining plant raw materials of Siberian iris (*Iris sibirica L.*) by biotechnology methods. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 4, 235–245. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018043887>
 44. Якупова, Э. Н., Зиятдинова, Г. К. (2023). Современные методы и направления развития аналитической химии флаванонов. *Журнал аналитической химии*, 78(4), 291–316. [Yakupova, E. N., Ziyatdinova, G. K. (2023). Modern methods and directions of development of analytical chemistry of flavanones. *Journal of Analytical Chemistry*, 78(4), 291–316. (In Russian)] <https://doi.org/10.31857/S0044450223040163>
 45. Karaboduk, K., Hasdemir, E. (2020). Simultaneous determination of quercetin and luteolin in mate and white tea samples by voltammetry. *Revue Roumaine de Chimie*, 65(4), 375–385. <https://doi.org/10.33224/rch.2020.65.4.07>
 46. Alpar, N., Yardim, Y., Şentürk, Z. (2018). Selective and simultaneous determination of total chlorogenic acids, vanillin and caffeine in foods and beverages by adsorptive stripping voltammetry using a cathodically pretreated boron-doped diamond electrode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 257, 398–408. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.10.100>

47. Ziyatdinova, G., Budnikov, H. (2018). Carbon nanomaterials and surfactants as electrode surface modifiers in organic electroanalysis. Chapter in a book: Nanoanalytics: Nanoobjects and Nanotechnologies in Analytical Chemistry. Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Munich/Boston, 2018. <https://doi.org/10.1515/9783110542011-007>
48. De Silva, K. K. H., Huang, H.-H., Joshi, R. K., Yoshimura, M. (2017). Chemical reduction of graphene oxide using green reductants, *Carbon*, 119, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.04.025>
49. Pwavodi, P. C., Ozyurt, V. H., Asir, S., Ozsoz, M. (2021). Electrochemical sensor for determination of various phenolic compounds in wine samples using Fe₃O₄ nanoparticles modified carbon paste electrode. *Micromachines*, 12(3), Article 312. <https://doi.org/10.3390/mi12030312>
50. Huang, J., Shen, X., Hu, Q., Ma, Y., Bai, S., Yue, G. et al. (2016). High sensitivity simultaneous determination of myricetin and rutin using a polyfurfural film modified glassy carbon electrode. *RSC Advances*, 6(98), 95435–95441. <https://doi.org/10.1039/C6RA20459G>
51. Wang, X., Wang, J., Zhang, L., Chen, G. (2019). Carbon nanotube-phenolic resin composite electrode fabricated by far infrared-assisted crosslinking for enhanced amperometric detection. *Electroanalysis*, 31(4), 756–765. <https://doi.org/10.1002/elan.201800604>
52. Przybylska, A., Gackowski, M., Koba, M. (2021). Application of capillary electrophoresis to the analysis of bioactive compounds in herbal raw materials. *Molecules*, 26(8), Article 2135. <https://doi.org/10.3390/molecules26082135>
53. Абдуллина, Р. Г., Пупыкина, К. А., Денисова, С. Г., Пупыкина, В. В. (2021). Биохимический состав плодов некоторых представителей рода *Sorbus* L. коллекции Южно-Уральского ботанического сада. *Химия растительного сырья*, 3, 235–243. [Abdullina, R. G., Pupykina, K. A., Denisova, S. G., Pupykina, V. V. (2021). Biochemical composition of fruits of some representatives of the genus *Sorbus* L. in collection of the South-Ural botanical garden. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 3, 235–243. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021037601>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Нициевская Ксения Николаевна — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, отдел пищевых систем и биотехнологий, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук 630501, Новосибирская обл., р.п. Краснообск, а/я 463 E-mail: nitsievskayakn@sfscs.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7302-106X	Kseniya N. Nitsievskaya , Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Department of Food Systems and Biotechnology, Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences Box 463, Novosibirsk region, 630501, Krasnoobsk, Russia E-mail: nitsievskayakn@sfscs.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7302-106X
Станкевич Светлана Владимировна — кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, отдел пищевых систем и биотехнологий, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук 630501, Новосибирская обл., р.п. Краснообск, а/я 463 E-mail: stankevichsv@sfscs.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5157-2004	Svetlana V. Stankevich , Candidate of Agricultural Sciences, Researcher, Department of Food Systems and Biotechnology, Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences Box 463, Novosibirsk region, 630501, Krasnoobsk, Russia E-mail: stankevichsv@sfscs.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5157-2004
Бородай Елена Валерьевна — старший научный сотрудник, отдел пищевых систем и биотехнологий, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук 630501, Новосибирская обл., р.п. Краснообск, а/я 463 E-mail: borodayev@sfscs.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4350-085X * автор для контактов	Elena V. Boroday , Senior Researcher, Department of Food Systems and Biotechnology, Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences Box 463, Novosibirsk region, 630501, Krasnoobsk, Russia E-mail: borodayev@sfscs.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4350-085X * corresponding author
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-32-43>



Поступила 15.09.2025

Поступила после рецензирования 18.02.2026

Принята в печать 24.02.2026

© Кручинин А. Г., Спирина М. Е., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

АМИНОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ГИДРОЛИЗАТОВ СЫВОРОТОЧНЫХ БЕЛКОВ, ФРАКЦИОНИРОВАННЫХ КАСКАДНО-СЕЛЕКТИВНОЙ МЕМБРАННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ

Кручинин А. Г.*, Спирина М. Е.

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

гидролиз,
биоактивные пептиды,
ультрафильтрация,
нанофильтрация,
свободные аминокислоты,
минеральные вещества,
перевариваемость

В данной статье обсуждается вопрос использования промышленных методов каскадно-селективной мембранной фильтрации для очистки ферментативных гидролизатов сыровоточных белков и фракционирования биоактивных пептидов. Основное внимание уделено комплексной оценке влияния данного технологического процесса на аминокислотный состав, биологическую ценность и кинетику переваривания *in vitro* полученных пептидных фракций в сравнении с интактными белками. Нативный и термоденатурированный концентрат сыровоточных белков гидролизали биферментной композицией (Alcalase и Formea CTL) и фракционировали методами ультра-, нанофильтрации и обратного осмоса. Основные результаты показали, что разработанный процесс каскадно-селективной ультра-нанофильтрации позволяет эффективно удалять высокомолекулярные белковые соединения, минеральные вещества и свободные аминокислоты. При этом в составе гидролизатов сохраняется фракция пептидов с молекулярной массой 0,4–5 кДа, обладающая максимальными антиоксидантной (1280 и 979 мкМ ТЭ/г БЭ) и АПФ-ингибирующей ($IC_{50}=0,10$ и $0,19$ мг/мл) активностями. Очищенные гидролизаты характеризовались сбалансированным аминокислотным профилем (отношение НАК/ЗАК 0,77–0,78), высоким содержанием ВСАА (19,07–19,20 г/100 г белка) и повышенным коэффициентом утилитарности (0,71–0,72) по сравнению с исходными концентратами сыровоточных белков. Оценка перевариваемости на модели INFOGEST 2.0 подтвердила высокую биодоступность, более быстрое и полное переваривание фракционированных гидролизатов по сравнению интактными белками. Полученные результаты открывают перспективы промышленного масштабирования технологии производства гидролизатов сыровоточных белков и их использования в качестве функциональных ингредиентов. Такие ингредиенты могут применяться при создании продуктов функционального и специализированного питания, включая протеиновые формулы для спортивного питания, нутритивной поддержки при метаболическом синдроме и возрастной саркопении, а также для коррекции хронического оксидативного стресса и профилактики гипертонии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования проводились в рамках государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН FGUS-2024.0001.

Received 15.09.2025

Accepted in revised 18.02.2026

Accepted for publication 24.02.2026

© Kruchinin A. G., Spirina M. E., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

AMINO ACID COMPOSITION AND BIOLOGICAL VALUE OF WHEY PROTEIN HYDROLYSATES FRACTIONATED BY CASCADE-SELECTIVE MEMBRANE FILTRATION

Aleksandr G. Kruchinin*, Maria E. Spirina

¹ V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

KEYWORDS:

hydrolysis,
bioactive peptides,
ultrafiltration,
nanodiafiltration, free amino acids, minerals,
digestibility

ABSTRACT

This article discusses the application of industrial cascade-selective membrane filtration techniques for the purification of enzymatic hydrolysates of whey proteins and the fractionation of bioactive peptides. The main focus is on a comprehensive assessment of the impact of this technological process on the amino acid composition, biological value, and *in vitro* digestion kinetics of the obtained peptide fractions in comparison with intact proteins. Native and heat-denatured whey protein concentrates were hydrolyzed using a two-enzyme system (Alcalase and Formea CTL) and fractionated by ultrafiltration, nanodiafiltration, and reverse osmosis. The key results showed that the developed cascade-selective ultra-nanodiafiltration process effectively removes high-molecular-weight protein compounds, minerals, and free amino acids. The hydrolysates retain a peptide fraction with a molecular weight of 0.4–5 kDa, which exhibits maximal antioxidant (1280 and 979 μM TE/g protein equivalent) and ACE-inhibitory ($IC_{50}=0.10$ and 0.19 mg/mL) activities. The purified hydrolysates were characterized by a balanced amino acid profile (EAA/NEAA ratio of 0.77–0.78), a high content of BCAA (19.07–19.20 g/100 g protein), and an increased coefficient of utility (0.71–0.72) compared to the initial whey protein concentrates. Digestibility assessment using the INFOGEST 2.0 model confirmed high bioavailability, as well as faster and more complete digestion of the fractionated hydrolysates compared to intact proteins. The obtained results open prospects for the industrial scaling of the technology for producing whey protein hydrolysates and their use as functional ingredients. Such ingredients can be applied in the development of functional and specialized food products, including protein formulas for sports nutrition, nutritional support for metabolic syndrome and age-related sarcopenia, as well as for the correction of chronic oxidative stress and the prevention of hypertension.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2024–0001 of the state assignment of the V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of RAS.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кручинин, А. Г., Спирина, М. Е. (2026). Аминокислотный состав и биологическая ценность гидролизатов сыровоточных белков, фракционированных каскадно-селективной мембранной фильтрацией. *Пищевые системы*, 9(1), 32–43. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-32-43>

FOR CITATION: Kruchinin, A. G., Spirina, M. E. (2026). Amino acid composition and biological value of whey protein hydrolysates fractionated by cascade-selective membrane filtration. *Food Systems*, 9(1), 32–43. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-32-43>

1. Введение

Современные мировые тенденции в области пищевой промышленности, нутрициологии, спортивного, детского и специализированного питания преобладают повышенный спрос на коммерческие концентраты белков, сбалансированные по аминокислотному составу и обладающие высокой биологической ценностью [1,2]. В данном аспекте особое внимание уделяется белкам молочной сыворотки, биологическая ценность и аминокислотный индекс усвояемости (PDCAAS) которых сопоставимы с яичным белком, считающимся эталонным. Белки молочной сыворотки характеризуются высоким содержанием незаменимых аминокислот и аминокислот с разветвленной цепью (BCAA), которые играют ключевую роль в активации mTOR-пути и стимуляции мышечного белкового синтеза. Кроме того, они богаты серосодержащими аминокислотами, задействованными в одноуглеродном метаболизме, процессах сворачивания и функционирования белков; именно эти аминокислоты служат лимитирующим субстратом для синтеза глутатиона — ключевого внутриклеточного антиоксиданта [3,4]. Высокий уровень сбалансированности аминокислотного профиля в сочетании с высокой биодоступностью и быстрой абсорбцией делает сывороточные белки ключевым компонентом специализированных протеиновых формул для различных физиологических потребностей в спортивном питании (ускорение восстановления и рост мышечной массы) [5–8], геронтологическом питании (профилактика саркопении) [9,10], детском питании (аминокислотный профиль максимально приближен к грудному молоку) [11–13], клинической нутрициологии (восстановление после травм и операций) [14–16] и пр.

Наряду с нативными сывороточными белками особый научный и практический интерес представляют их гидролизованные формы, получаемые путем направленной ферментативной биоконверсии пептидных связей в аминокислотной последовательности белковой молекулы. В отличие от нативных форм белка, гидролизаты сывороточных белков обладают рядом доказанных преимуществ, включая более быстрое переваривание и транспорт аминокислот в кровоток [17], сниженную аллергенность [18], более высокую скорость смачиваемости и растворимости, повышенную термоустойчивость в широком диапазоне pH [19]. С развитием современных аналитических методов в области пищевой пептидомии в гидролизатах сывороточных белков идентифицирован широкий спектр биоактивных пептидов, проявляющих регуляторные функции в организме и оказывающие целенаправленное физиологическое воздействие, выходящее за рамки простого нутритивного обеспечения организма. Многочисленными исследованиями доказано, что данные соединения обладают рядом фармакологических эффектов, таких как антиоксидантная [17,20–22], антигипертензивная [23–26], антидиабетическая [27–30], антимикробная [31,32] и иммуномодулирующая [33–35] активности. Указанные эффекты обусловлены наличием в их структуре специфических аминокислотных последовательностей, способных взаимодействовать с ключевыми биологическими мишенями. Выход пептидов с целевой биологической функцией напрямую зависит от субстратной специфичности протеаз (комплекса протеаз), конформационных особенностей и аминокислотной последовательности белкового субстрата, а также от степени гидролиза, регулируемой кинетическими параметрами процесса (субстрат-ферментное соотношение, pH, температура, продолжительность реакции) [36]. При этом следует констатировать, что даже использование современных методов таргетированной ферментативной биоконверсии белка, основанных на селективном протеолизе, приводит к получению гетерогенных смесей пептидов и свободных аминокислот с полимодальным распределением по молекулярной массе и с варибельным профилем биоактивности [37]. В связи с этим биоактивные пептиды, полученные в результате таргетированной биоконверсии сывороточных белков, требуют дальнейшей очистки от компонентов сложной матрицы гидролизата и последующего фракционирования с целью сохранения/усиления биофункциональных свойств. В работах [38,39] показано, что повышенное содержание свободных аминокислот в гидролизатах, особенно при глубоком протеолизе, увеличивает горечь и осмотичность, снижая их биологическую ценность по сравнению с очищенными пептидами. Кроме того, технологический процесс получения гидролизатов сопряжен с необходимостью коррекции электрохимических параметров среды (поддержание статического pH), что предопределяет необходимость дополнительной обработки реакционной смеси для снижения pH, ионной силы и концентрации солей. В то же время в ряде работ [40,41] отмечено, что ферментативный гидролиз эффективно снижает антигенность молочных белков, однако протеазы, являясь белковыми веществами, способны сенсibilизировать иммун-

ную систему и инициировать перекрестные аллергические реакции. Таким образом, разработка эффективных технологий мембранной очистки и фракционирования биоактивных пептидов представляется актуальным и стратегически важным направлением для решения обозначенных проблем, что напрямую будет способствовать повышению биологической ценности, функциональности и безопасности конечного продукта.

Целью данного исследования является разработка технологии мембранного фракционирования и очистки ферментативных гидролизатов сывороточных белков, направленной на селективное удаление балластных компонентов, включая свободные аминокислоты, минеральные вещества и остаточные протеазы. Разрабатываемая технология позволяет получать гидролизаты, обогащенные пептидными фракциями с целевой биологической активностью, в частности антиоксидантной и АПФ-ингибирующей. Кроме того, в работе исследовано влияние проведенной обработки на аминокислотный профиль, биологическую ценность и кинетику переваривания *in vitro* гидролизатов по сравнению с интактными концентратами белков. Данные исследования являются критически важными для решения технологических задач, связанных со стандартизацией состава и биодоступностью активных пептидных фракций, что позволит в полной мере реализовать их терапевтический потенциал в создании продуктов специализированного назначения от гипоаллергенных смесей и средств энтерального питания до спортивных нутрицевтиков и функциональных продуктов, направленных на профилактику возраст-индуцированных заболеваний, таких как хронический оксидативный стресс организма и гипертония.

2. Объекты и методы

2.1. Объекты

Сладкая сыворотка, полученная от производства полутвердого сыра «Мантова», была предоставлена компанией ООО «Итальянские традиции» (Москва, Россия). Коммерческие ферментные препараты Alcalase 2.4L (субтилизин) с протеолитической активностью 2,4 AU-A/г и Formea CTL (химотрипсиноподобная эндопротеаза) с протеолитической активностью 300 KPROT/г были приобретены у российского дистрибьютора компании Novozymes A/S, (Багсверд, Дания). Все реактивы, используемые в исследовании, были аналитической степени чистоты. Во всех экспериментах использовалась бидистиллированная вода.

2.2. Концентрирование сывороточных белков

Подсырную сыворотку подогрели до температуры $(40 \pm 5)^\circ\text{C}$ в вискубаторе FlowTech 4/5–10 (Them, Дания), обезжирили и очистили от казеиновой пыли на лабораторном сепараторе FJ 90 PP (MilkyDay, Чехия). Осветленную и обезжиренную сыворотку разделяли на две аликвотные части равного объема. Первую часть подсырной сыворотки (CHW (RC)) пастеризовали в вискубаторе FlowTech 4/5–10 (Them, Дания) при температуре $(72 \pm 2)^\circ\text{C}$ с выдержкой 20–25 с и охлаждали до температуры $(10 \pm 2)^\circ\text{C}$. Концентрирование белка проводилось с использованием ультрафильтрации на пилотной экспериментальной установке AL 362 (ООО «Альтаир», Россия), оснащенной блоком мембранных элементов из полиэфирсульфона с отсечкой по молекулярной массе (MWCO) 5 кДа. Концентрирование белка осуществляли при давлении $0,50 \pm 0,05$ МПа на входе в мембранный аппарат и $0,37 \pm 0,03$ МПа на выходе. Объемный фактор концентрирования составлял 5, что соответствовало на выходе массовой доли белка 3,4 %. Другую часть сыворотки подвергали термоденатурации белка (CHW (RC) HD) в вискубаторе FlowTech 4/5–10 (Them, Дания) в присутствии 10 мМ сульфата кальция при температуре $(95 \pm 2)^\circ\text{C}$ и продолжительности 120 минут. Термоденатурированный белок отделяли с использованием технологии Centry Whey на экспериментальной декантерной центрифуге периодического действия при скорости вращения 4000 об/мин (3500 g), температуре $(55 \pm 5)^\circ\text{C}$ и продолжительности процесса 10 минут, что позволяло получать концентрат с массовой долей белка 11 %. Полученный концентрат стандартизовали вторичной сывороткой до массовой доли белка 3,4 % и подвергали одноступенчатой гомогенизации при давлении 45 МПа на плунжерном гомогенизаторе HomoLab 2.20 (FBF, Италия).

2.3. Гидролиз сывороточных белков

Ферментативный гидролиз концентратов сывороточных белков CHW (RC) и CHW (RC) HD проводили с использованием биферментной системы Alcalase 2.4L (субтилизин) и Formea CTL (химотрипсиноподобная эндопротеаза) в соотношении 75/25 в пересчете на белковую часть. Гидролиз осуществляли в биореакторе с рубашкой

«Алхитех», Россия) объемом 5000 мл с магнитной мешалкой SP-16 (MIULAB, Китай), соединенных последовательно с циркулирующей водяной баней. Биореактор был оборудован pH-метром Starter 300 с электродом ST 320 (Ohaus, США) и перистальтическим насосом для дозирования 5 М раствора гидроксида калия, что обеспечивало поддержание статического pH реакционной среды с допустимым отклонением $\pm 0,02$. Процесс гидролиза проводили биферментной композицией в соотношении ферментов (в пересчете на белковую часть) к субстрату 1:1000 (мас./мас.) при температуре $(51 \pm 1)^\circ\text{C}$, активной кислотности реакционной среды $8,30 \pm 0,02$ ед. pH и продолжительности 180 минут. Термическую инактивацию ферментных препаратов осуществляли посредством непрерывной подачи гидролизата через трубчатый теплообменник в соседний биореактор, где гидролизат сывороточных белков мгновенно нагревался до температуры $(87 \pm 2)^\circ\text{C}$ и выдерживался на протяжении 10 минут, после чего происходило его охлаждение до температуры $(10 \pm 2)^\circ\text{C}$ по обратной схеме.

2.4. Очистка и фракционирование гидролизатов сывороточных белков

Гидролизаты сывороточных белков очищали от высокомолекулярных белковых соединений на пилотной экспериментальной установке AL 362 (ООО «Альтаир», Россия) с использованием ультрафильтрационных мембранных модулей из полиэфирсульфона с MWCO 5 и 10 кДа. Рабочее давление на входе в мембранный аппарат составляло $0,50 \pm 0,05$ МПа, а на выходе — $0,37 \pm 0,03$ МПа. Очистка от свободных аминокислот и минеральных солей, а также концентрирование пептидов проводились на той же установке с использованием нанофильтрационного мембранного модуля из полиэфирсульфона с MWCO 0,4 кДа. Давление на входе/выходе поддерживали на уровне 1,5/1,1 МПа соответственно. Диафильтрацию проводили с применением обратноточеской воды в соотношении 1:1 к концентрату гидролизованных белков. Снижение активной кислотности проводили на промежуточной стадии диафильтрации путем введения 1М раствора соляной кислоты до достижения уровня pH 6,8. Концентрированные образцы гидролизованных сывороточных белков после процесса очистки и фракционирования подвергались дегидратации на распылительной сушилке BXT-2000MLH (Shanghai Yuhua Instrument Equipment Co. Ltd, Китай) с диаметром форсунки 1 мм при температуре воздуха на входе $(175 \pm 5)^\circ\text{C}$ и на выходе — $(75 \pm 5)^\circ\text{C}$.

2.5. Химический и физический анализ

Для исследования физико-химических свойств сыровотки использовались стандартизованные методы. Массовую долю белка (в эквиваленте) определяли методом Кьельдаля через содержание общего азота в соответствии с ISO 1871:2009¹, ISO 8968-1:2014² на автоматическом анализаторе Kjelttec-2400 (Foss Electric, Дания) с последующим его пересчетом на белок с коэффициентом 6,28. Массовую долю жира определяли методом Гербера в соответствии с ISO 19662:2018³ и ISO 11870:2009⁴. Массовую долю лактозы определяли ферментативным методом в соответствии с ISO 26462:2010⁵. Массовую долю сухих веществ измеряли термогравиметрическим методом в соответствии с ISO 6731:2010⁶. Общее содержание минеральных веществ определяли сжиганием высушенных образцов при температуре 550°C в муфельной электропечи МП-2УМ (Утянский завод лабораторных электропечей, Литва) в соответствии с методикой [42]. Активную кислотность измеряли потенциометрическим методом с помощью стационарного pH-метра Aquasearcher AB33PH с электродом ST 320 (Ohaus, США). Концентрацию кальция, магния, натрия, калия и фосфора определяли с помощью оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) на приборе Agilent 5110 ICP-OES (Agilent Technologies, Малайзия) в соответствии с методикой производителя.

Молекулярно-массовое распределение белково-пептидных фракций проводили методом высокоэффективной жидкостной хромато-

графии в соответствии с протоколом [43] на хроматографе «МАЭСТРО» (ООО «Интерлаб», Россия). Хроматографическое разделение проводили при температуре 25°C и скорости потока 1 мл/мин с введением образца объемом 20 мкл в аналитическую колонку ZORBAX C18 250 мм \times 4,6 мм, диаметр пор 300 Å (Agilent Technologies Inc., США). Детекцию осуществляли при длине волны 214 и 280 нм. В полученных хроматограммах с использованием программного обеспечения «Мультихром» (ООО «Амперсэнд», Россия) было идентифицировано относительное содержание фракций с молекулярно-массовым распределением: < 1 кДа, 1–5 кДа, 5–10 кДа и > 10 кДа.

Содержание и идентификацию аминокислот определяли согласно ГОСТ Р 55569-2013⁷ и методике М 04-94-2021⁸ «Пищевая продукция. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель»» на приборе «Капель 205М» (ООО «Люмэкс-маркетинг», Россия). В качестве аналитических стандартов использовали чистые аминокислоты с содержанием основного вещества не менее 98 % (Sigma-Aldrich, США).

2.6. Анализ функциональных свойств и биологической ценности

Степень гидролиза оценивали спектрофотометрическим методом согласно протоколам, описанным в [44,45], на спектрофотометре-флуориметре Feyond-A400 (Allsheng, Китай) с применением реактива TNBS (2,4,6-тринитробензолсульфоновая кислота), специфически реагирующего с первичными аминогруппами с образованием хромофора с максимумом поглощения при длине волны 340 нм.

Определение антиоксидантной активности по методу TEAC проводили в соответствии с протоколом [46]. Метод основан на способности образца нейтрализовать катион-радикал ABTS (2,2'-азинобис(3-этилбензотиазолин-6-сульфоновой кислоты)) с последующим выражением антиоксидантной активности в эквивалентах Тролокса относительно калибровочного графика. Нейтрализацию катион-радикала ABTS оценивали с использованием спектрофотометра-флуориметра Feyond-A400 (Allsheng, Китай) при длине волны 734 нм.

Оценку гипотензивных свойств гидролизованных белков молочной сыровотки проводили по способности ингибировать ангиотензин-1-превращающий фермент (АПФ) в соответствии с протоколом [47,48] и выражали в концентрации (мг белка/мл), ингибирующей 50 % активности АПФ (IC50). Кинетику возрастания интенсивности флуоресценции регистрировали в течение 15 мин с интервалом в 20 с на микропланшетном спектрофотометре-флуориметре Feyond-A400 (Allsheng, Китай) при температуре 37°C , длине волны возбуждения и регистрации флуоресценции 320 и 420 нм соответственно.

Расчеты сбалансированности аминокислотного состава, такие как аминокислотный скор, отношение незаменимых аминокислот (НАК) к заменимым аминокислотам (ЗАК), отношение незаменимых кислот к общему содержанию аминокислот в белке, коэффициент утилитарности, избыточность и сопоставимую избыточность незаменимых аминокислот, индекс незаменимых аминокислот проводили в соответствии с общепринятыми методиками, приведенными в работе [49].

Моделирование переваривания *in vitro* осуществляли по стандартизованному международному протоколу INFOGEST 2.0 [50]. Анализ продуктов переваривания на каждой стадии процесса проводили по методикам, описанным в [51], с изменением в части оценки коэффициента перевариваемости. В частности, к инкубационной смеси по окончании каждой стадии переваривания добавлялся 24 % раствор трихлоруксусной кислоты (ТХУ) для осаждения белков и пептидов с молекулярной массой более $\sim 1-3$ кДа. Образцы инкубировали при комнатной температуре, охлаждали до 4°C и центрифугировали (8000g) в течение 10 минут. Для измерения содержания белка в осадке применялся анализ по методу Кьельдаля. Коэффициент перевариваемости (КП) рассчитывался по формуле 1:

$$\text{КП} = (m_{\text{исх}} \times B_{\text{исх}} - (m_{\text{исх}} \times B_{\text{исх}} - m_{\text{Ф}} \times B_{\text{Ф}})) / (m_{\text{исх}} \times B_{\text{исх}}) \times 100 \quad (1),$$

где: $m_{\text{исх}}$ — масса исходного образца, г; $m_{\text{Ф}}$ — масса фильтрата после центрифугирования, г; $B_{\text{исх}}$ — белок в исходном образце, %; $B_{\text{Ф}}$ — белок в фильтрате после центрифугирования, %

⁷ ГОСТ Р 55569-2013 «Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Определение протеиногенных аминокислот методом капиллярного электрофореза». М.: Стандартинформ, 2020. — 18 с.

⁸ М 04-94-2021 «Пищевая продукция. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель»». ООО «Люмэкс-маркетинг», 2021. (Свидетельство об аттестации методики измерений № 032/РА.RU.311278/2022 от 15 апреля 2022 г.).

2.7. Статистика

Статистический анализ данных был выполнен с использованием пакета программного обеспечения Statistica 2010 (Statsoft, США). Все измерения проводились в трех независимых повторностях. Результаты представлены как среднее значение \pm стандартное отклонение (SD). Статистический анализ экспериментальных данных осуществляли с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и апостериорного теста Тьюки с использованием пакета статистических программ RStudio (Posit Software, США) при уровне значимости $p < 0,05$.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Оценка биологической активности гидролизованных фракций сывороточных белков

Молекулярная масса пептидов является ключевым фактором, определяющим их функциональные и биоактивные свойства в белковых гидролизатах. Контроль молекулярно-массового распределения на этапе производства позволяет целенаправленно изолировать фракции с заданной биологической активностью (антиоксидантной и антигипертензивной) и одновременно производить очистку от высокомолекулярных соединений и свободных аминокислот. В данном исследовании гидролизаты сывороточных белков фракционировали последовательно на полиэфирсульфоновых мембранах с размером пор 10 кДа (УФ-10), 5 кДа (УФ-5), 0,4 кДа (НФ-0,4) и 0,1 нм (ОО). На каждом этапе проводили диалфильтрацию обратноточной водой для максимальной очистки и получения валидных результатов. Исследование молекулярно-массового распределения в исходном сырье, гидролизатах, а также в их белково-пептидных фракциях (ретенатах) представлено на Рисунке 1.

Анализ молекулярно-массового распределения показал, что в концентратах CHW (RC) и CHW (RC) HD доминируют высокомолекулярные белковые фракции с молекулярной массой выше 10 кДа, что характерно для негидролизованных белков молочной сыворотки и ассоциированных форм (димеров/тримеров) гликомакропептида [52]. Также в составе концентратов CHW (RC) и CHW (RC) HD идентифицировано 7,7% и 10,5% фракций с молекулярной массой 5–10 кДа, что соотносится с молекулярной массой мономерной формы гликомакропептида (~7,5 кДа) [53] и протеозо-пептонной фракции PP8S (~9,0 кДа) [54]. Кроме того, в анализируемых белковых концентратах идентифицировано 2,5% (CHW (RC)) и 3,6% (CHW (RC) HD) фракций с молекулярной массой 1–5 кДа, очевидно, представляющих собой протеозо-пептонную фракцию PP8F (~4,0 кДа) [55] и другие пептидные фрагменты частичного расщепления белков аутохтонными протеазами молока. В образцах гидролизатов сывороточных белков CHW (RC) и CHW (RC) HD со степенью гидролиза $19,9 \pm 0,4$ и $21,2 \pm 0,8$ соответственно отмечено резкое снижение доли высокомолекулярной фракции (> 10 кДа) до 1,21% и 1,32% по сравнению с интактными белками. В обоих образцах гидролизатов доминируют фракции с молекулярной массой 1–5 кДа (51,8% и 59,5%) и в меньшей степени фракции с молекулярной массой 5–10 кДа (37,4% и 27,2%). Содержание короткоцепочечных пептидов и свободных аминокислот в гидролизатах сывороточных белков находилось на уровне 9,6% для CHW (RC) и 12,0% для CHW (RC) HD. Применение для очистки гидролизатов ультрафильтрации с MWCO 10 кДа привело к селективной

изоляции и концентрированию высокомолекулярных белковых соединений, на долю которых приходилось 68,6% для CHW (RC) и 61,1% для CHW (RC) HD. Последующая ультрафильтрация с MWCO 5 кДа позволила получить фракции с доминированием пептидов среднего размера (5–10 кДа) 88,3% и 84,1% соответственно при отсутствии высокомолекулярных белковых компонентов, что указывает на селективное удаление негидролизованных белков и протеолитических ферментов (по данным Uniprot, молекулярная масса субъединицы ~38 кДа, а химотрипсинаподобной эндопроtease ~27 кДа). Дальнейшее фракционирование гидролизатов сывороточных белков CHW (RC) и CHW (RC) HD с использованием нанофильтрации с MWCO 0,4 кДа позволило получить ретенат, где основная масса белковых веществ (74,4% и 78,7%) приходится на пептиды с молекулярной массой 1–5 кДа. В то же время в ретенате, полученном нанофильтрацией, 22,3% и 19,2% составляют фракции с молекулярной массой < 1 кДа, удержание которых может объясняться селективностью мембраны, а также возникновением эффекта поляризационной концентрации на поверхности мембраны и формированием вторичного динамического слоя с меньшей пористостью [56,57]. Пермеат, полученный после нанофильтрации и сконцентрированный обратным осмосом, состоял исключительно из компонентов с молекулярной массой < 1 кДа, представляя собой смесь свободных аминокислот и короткоцепочечных пептидов.

На следующем этапе было проведено комплексное исследование взаимосвязи между молекулярно-массовым распределением пептидных фракций, полученных методами каскадной ультра- и нанофильтрации, и их биологической активностью (Рисунок 2).

Полученные данные демонстрируют существенные различия в биологической активности между нативными и термоденатурированными белками, а также их гидролизатами. Гидролизаты CHW (RC) и CHW (RC) HD показали в 5,2 и 5,0 раза более высокую антиоксидантную активность (984 и 768 мкМ ТЭ/г БЭ) по сравнению с нативным и термоденатурированным концентратами сывороточных белков (189 и 153 мкМ ТЭ/г БЭ) соответственно. Среди фракций наибольшей антиоксидантной активностью обладала фракция 0,4–5 кДа (1280 и 979 мкМ ТЭ/г БЭ), что в среднем на 29% выше, чем у соответствующих гидролизатов сывороточных белков. Фракция 5–10 кДа продемонстрировала умеренную антиоксидантную активность (430 и 380 мкМ ТЭ/г БЭ), в то время как фракция > 10 кДа (271 и 217 мкМ ТЭ/г БЭ) по антиоксидантной активности была незначительно выше соответствующих гидролизатов до момента их фракционирования. При этом фракция < 0,4 кДа характеризовалась минимальной антиоксидантной активностью (18 и 15 мкМ ТЭ/г БЭ), что свидетельствует о потере антиоксидантных свойств при переходе к свободным аминокислотам и короткоцепочечным пептидам. Результаты оценки АПФ-ингибирующей активности показали, что для гидролизатов CHW (RC) и CHW (RC) HD характерно ее увеличение в 65 и 48 раз по сравнению с соответствующими концентратами нативных (снижение IC50 с 17,61 до 0,27 мг БЭ/мл) и термоденатурированных (снижение IC50 с 22,89 до 0,48 мг БЭ/мл) белков. Максимальной АПФ-ингибирующей активностью обладала фракция 0,4–5 кДа гидролизатов нативных белков (IC50=0,10 мг БЭ/мл) и термоденатурированных белков (IC50=0,19 мг БЭ/мл), что в 2,7 и 2,5 раза превышает активность исходных гидролизатов сывороточных белков. Фракция

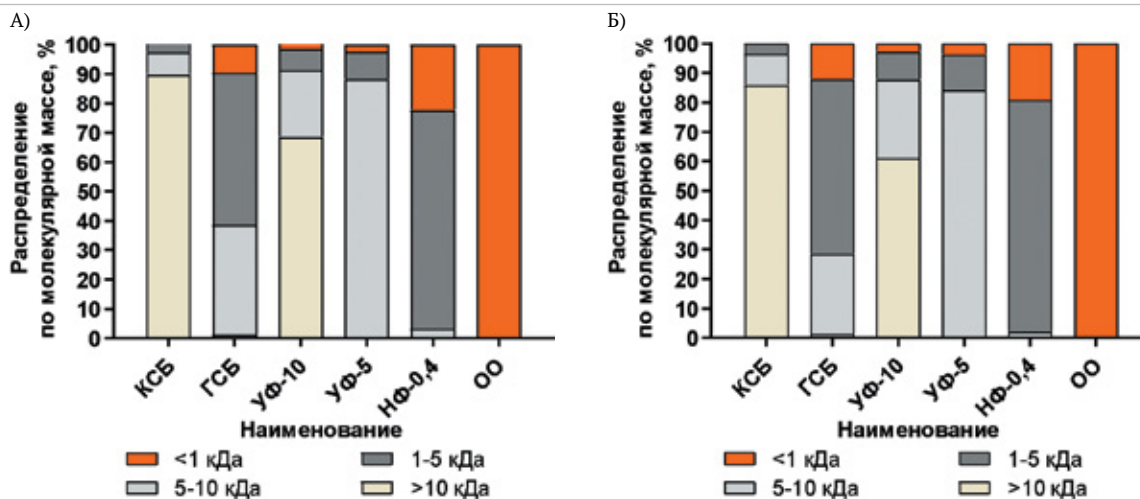


Рисунок 1. Молекулярно-массовое распределение белково-пептидных фракций (А – CHW (RC); Б – CHW (RC) HD)
Figure 1. Molecular weight distribution of protein-peptide fractions (A – CHW (RC); B – CHW (RC) HD)

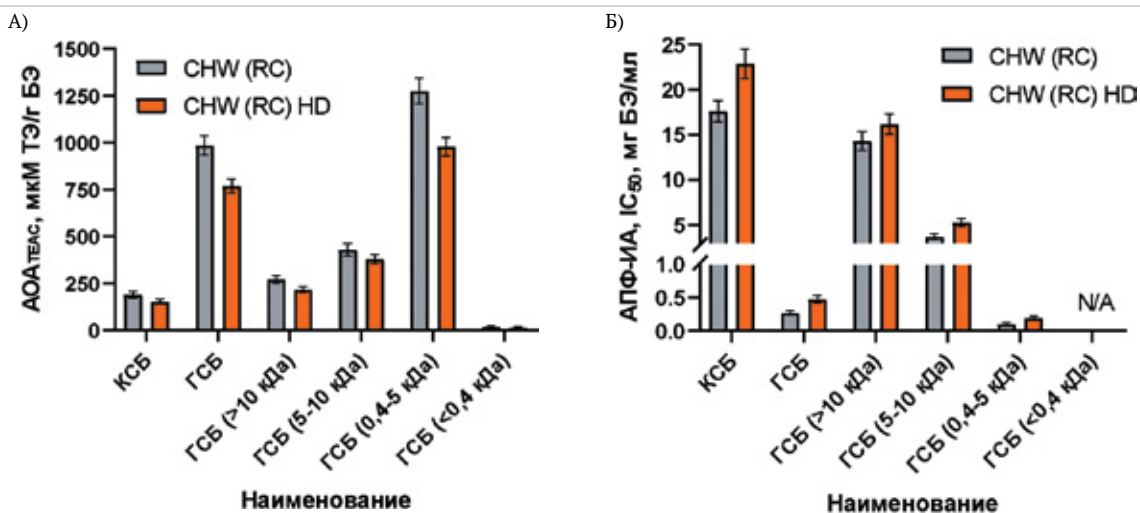


Рисунок 2. Антиоксидантная активность (А) и АПФ-ингибирующая активность (Б) белково-пептидных фракций гидролизатов сывороточных белков

Figure 2. Antioxidant activity (A) and ACE-inhibitory activity (Б) of protein-peptide fractions of whey protein hydrolysates

5–10 кДа показала значимую, но меньшую АПФ-ингибирующую активность, IC50 которой составляла 3,73 мг БЭ/мл для CHW (RC) и 5,30 мг БЭ/мл для CHW (RC) HD. АПФ-ингибирующая активность в ретенатах высокомолекулярных фракций > 10 кДа была всего в 1,2 и 1,4 раза выше, чем в соответствующих концентратах сывороточных белков, в том числе за счет присутствия в составе более мелких фракций (Рисунок 1). Во фракции с молекулярной массой < 0,4 кДа АПФ-ингибирующая активность не обнаружена, что подтверждает необходимость определенной длины пептидной цепи для проявления данной биологической активности.

Таким образом, последовательная фильтрация с удалением негидролизованых высокомолекулярных белковых соединений и протеаз методом ультрафильтрации (MWCO 10 кДа), а также концентрирование пептидных фракций методом нанофильтрации (MWCO 0,4 кДа) представляет собой научно обоснованный подход. Фракционирование пептидов с молекулярной массой 0,4–10 кДа методом каскадно-селективной ультра-нанофильтрации является компромиссом между высокой биологической (антиоксидантной и АПФ-ингибирующей) активностью и потенциальной минимизацией горького вкуса, умеренной осмоляльностью, сохранением высокой биологической ценности и сбалансированности по незаменимым аминокислотам.

3.2. Фракционирование и очистка биологически активных фракций сывороточных белков

Многочисленные работы [58,59] показали, что классический электродиализ не эффективен для очистки гидролизатов пищевых белков от минеральных солей ввиду разнонаправленной миграции

основных/катионных, кислых/анионных пептидов и аминокислот в электрическом поле, что может оказать негативное влияние на биофункциональные свойства гидролизатов. Исходя из этого, на следующем этапе работ были исследованы подходы к частичной деминерализации (очищенных с помощью ультрафильтрации с MWCO 10 кДа) гидролизатов методом нанодиафильтрации, где на 1 этапе гидролизат концентрировали (ГСБ-Н), на 2 этапе подкисляли ретенат раствором соляной кислоты и промывали одинарным объемом обратноосмотической воды (ГСБ ДФ-1), а на третьем этапе осуществляли окончательную промывку одинарным объемом обратноосмотической воды (ГСБ ДФ-2). Результаты изменения физико-химических показателей в процессе диафильтрации представлены в Таблице 1.

Анализ данных Таблицы 1 показал, что при применении одноступенчатой нанофильтрации гидролизатов сывороточных белков уровень деминерализации составляет 28–29% (по отношению к м.д. сухих веществ), при этом кислотность системы достоверно не изменяется. Нанодиафильтрация с использованием подкисленной воды позволила снизить активную кислотность до нейтрального рН и повысить уровень деминерализации до 36%, а дальнейшая диафильтрация обратноосмотической водой — до 54–56%. Детализация изменений минерального состава представлена в Таблице 2. При этом совокупная потеря азотистых веществ в эквиваленте белка составила 6,1% для гидролизата нативных сывороточных белков CHW (RC) и 7,8% для гидролизата термоденатурированных сывороточных белков CHW (RC) HD. Данные значения коррелируют

Таблица 1. Изменение физико-химических показателей в процессе нанодиафильтрации гидролизатов сывороточных белков

Table 1. Changes in physicochemical parameters during nanodiafiltration of whey protein hydrolysates

Наименование показателя	Массовая доля жира, %	Массовая доля белка (эквивалент), %	Массовая доля лактозы, %	Массовая доля сухих веществ, %	Массовая доля золы, %	Активная кислотность, рН
Гидролизат CHW (RC)						
ГСБ	Отс.	3,32 ± 0,09 ^c	4,95 ± 0,14 ^c	9,79 ± 0,21 ^c	1,05 ± 0,04 ^c	8,25 ± 0,05 ^a
Ретенат ГСБ	Отс.	6,70 ± 0,14 ^a	8,92 ± 0,32 ^a	17,80 ± 0,42 ^{ab}	1,34 ± 0,07 ^a	8,21 ± 0,11 ^a
Пермеат ГСБ	Отс.	0,23 ± 0,02 ^d	0,45 ± 0,05 ^d	1,45 ± 0,08 ^d	0,54 ± 0,03 ^e	8,30 ± 0,06 ^a
Ретенат ГСБ ДФ-1	Отс.	6,49 ± 0,16 ^{ab}	8,61 ± 0,29 ^a	17,04 ± 0,37 ^b	1,15 ± 0,05 ^{bc}	6,82 ± 0,06 ^b
Пермеат ГСБ ДФ-1	Отс.	0,13 ± 0,03 ^{ef}	0,12 ± 0,07 ^e	0,87 ± 0,16 ^{ef}	0,46 ± 0,04 ^{fg}	6,87 ± 0,07 ^b
Ретенат ГСБ ДФ-2	Отс.	6,33 ± 0,10 ^b	8,39 ± 0,30 ^a	16,22 ± 0,44 ^b	0,76 ± 0,04 ^d	6,75 ± 0,09 ^b
Пермеат ГСБ ДФ-2	Отс.	0,07 ± 0,02 ^f	0,09 ± 0,06 ^e	0,69 ± 0,10 ^f	0,34 ± 0,03 ^h	6,82 ± 0,07 ^b
Гидролизат CHW (RC) HD						
ГСБ	Отс.	3,43 ± 0,08 ^c	4,79 ± 0,17 ^c	9,88 ± 0,24 ^c	1,12 ± 0,07 ^c	8,17 ± 0,08 ^a
Ретенат ГСБ	Отс.	6,76 ± 0,15 ^a	8,83 ± 0,30 ^a	17,98 ± 0,36 ^a	1,46 ± 0,09 ^a	8,14 ± 0,05 ^a
Пермеат ГСБ	Отс.	0,30 ± 0,03 ^d	0,52 ± 0,06 ^d	1,58 ± 0,15 ^d	0,57 ± 0,03 ^e	8,25 ± 0,07 ^a
Ретенат ГСБ ДФ-1	Отс.	6,38 ± 0,12 ^b	8,33 ± 0,26 ^{ab}	16,86 ± 0,30 ^b	1,21 ± 0,06 ^b	6,84 ± 0,06 ^b
Пермеат ГСБ ДФ-1	Отс.	0,17 ± 0,04 ^e	0,27 ± 0,08 ^e	1,14 ± 0,16 ^e	0,49 ± 0,04 ^f	6,93 ± 0,04 ^b
Ретенат ГСБ ДФ-2	Отс.	6,25 ± 0,12 ^b	8,24 ± 0,27 ^b	16,24 ± 0,31 ^b	0,84 ± 0,03 ^d	6,79 ± 0,07 ^b
Пермеат ГСБ ДФ-2	Отс.	0,09 ± 0,02 ^f	0,14 ± 0,05 ^e	0,81 ± 0,09 ^f	0,37 ± 0,04 ^{gh}	6,87 ± 0,08 ^b

Примечание: Данные в таблице представлены как среднее значение ± SD (n=3). Надстрочные буквы (a–g) в пределах одного столбца отражают значительные различия между группами, по данным дисперсионного анализа (ANOVA) с последующим тестом Тьюки (p < 0,05).

Таблица 2. Изменение содержания основных минеральных веществ (макроэлементов) при нанодиафильтрации гидролизатов сывороточного белка

Table 2. Changes in major mineral content (macroelements) during nanodiafiltration of whey protein hydrolysates

Наименование показателя	Содержание основных минеральных веществ (макроэлементов), мг/кг				
	Кальций	Калий	Магний	Натрий	Фосфор
Гидролизат CHW (RC)					
ГСБ	582 ± 50 ^d	3657 ± 284 ^{bcd}	125 ± 18 ^{ab}	398 ± 30 ^b	569 ± 27 ^{cd}
Ретентат ГСБ	846 ± 85 ^{abc}	4238 ± 302 ^{ab}	173 ± 21 ^a	569 ± 42 ^a	793 ± 42 ^a
Пермеат ГСБ	16 ± 3 ^f	1508 ± 102 ^f	15 ± 4 ^c	242 ± 24 ^c	65 ± 7 ^e
Ретентат ГСБ ДФ-1	791 ± 68 ^{bcd}	3055 ± 235 ^d	155 ± 20 ^{ab}	383 ± 30 ^b	650 ± 35 ^{bc}
Пермеат ГСБ ДФ-1	38 ± 6 ^e	1144 ± 88 ^g	8 ± 2 ^d	155 ± 17 ^d	52 ± 5 ^{ef}
Ретентат ГСБ ДФ-2	747 ± 59 ^{cd}	2009 ± 157 ^e	127 ± 19 ^{ab}	253 ± 25 ^c	564 ± 31 ^{cd}
Пермеат ГСБ ДФ-2	21 ± 5 ^{ef}	859 ± 55 ^h	7 ± 2 ^d	105 ± 10 ^e	49 ± 6 ^{ef}
Гидролизат CHW (RC) HD					
ГСБ	716 ± 57 ^{cd}	3913 ± 294 ^{abc}	124 ± 18 ^{ab}	398 ± 31 ^b	534 ± 25 ^d
Ретентат ГСБ	1041 ± 103 ^a	4535 ± 325 ^a	171 ± 21 ^{ab}	569 ± 42 ^a	745 ± 40 ^{ab}
Пермеат ГСБ	18 ± 7 ^f	1795 ± 133 ^{ef}	16 ± 4 ^c	248 ± 27 ^c	64 ± 7 ^e
Ретентат ГСБ ДФ-1	1008 ± 97 ^{ab}	3359 ± 249 ^{cd}	159 ± 20 ^{ab}	430 ± 38 ^b	692 ± 38 ^e
Пермеат ГСБ ДФ-1	35 ± 8 ^e	1249 ± 94 ^g	13 ± 3 ^{cd}	148 ± 18 ^d	56 ± 6 ^{ef}
Ретентат ГСБ ДФ-2	937 ± 96 ^{abc}	2116 ± 164 ^e	118 ± 17 ^b	266 ± 27 ^c	556 ± 33 ^{cd}
Пермеат ГСБ ДФ-2	25 ± 7 ^{ef}	980 ± 66 ^{gh}	9 ± 3 ^{cd}	96 ± 9 ^e	46 ± 6 ^f

Примечание: Данные в таблице представлены как среднее значение ± SD ($n=3$). Надстрочные буквы (a–g) в пределах одного столбца отражают значительные различия между группами, по данным дисперсионного анализа (ANOVA) с последующим тестом Тьюки ($p < 0,05$).

со степенью гидролиза и молекулярно-массовым распределением белково-пептидных фракций в гидролизатах и в целом соответствует переходу в пермеат свободных аминокислот, ди- и трипептидов, а также небелковых азотистых соединений.

Из данных Таблицы 2 видно, что при использовании нанодиафильтрации деминерализация гидролизатов сывороточных белков CHW (RC) и CHW (RC) HD обеспечивается в большей степени за счет удаления одновалентных ионов (Na^+ , K^+) и в меньшей степени — двухвалентных (Ca^{2+} , Mg^{2+}) или многовалентных ионов. Так, отмечено, что при выбранной схеме нанодиафильтрации гидролизатов сывороточных белков уровень деминерализации по K^+ составляет в среднем 67 %, по Na^+ — 61 %, по Mg^{2+} — 40 %, по Ca^{2+} — 22 %, что в целом сопоставимо с результатами [60,61]. Фосфор (P) преимущественно задерживается в ретентате из-за его химической связи с кальцием и магнием (коллоидные фосфаты), что снижает его миграцию через мембранный слой в пермеат при нанодиафильтрации. Таким образом, трехступенчатая нанодиафильтрация обеспечивает селективное разделение минеральных веществ за счет различий в их химической природе. В результате из-за низкой молекулярной массы большая часть одновалентных ионов (K^+ , Na^+), добавленных при рН-стабилизации гидролиза, перешла в пермеат, а наиболее важные для функционирования и жизнедеятельности организма двухвалентные

ионы кальция и магния (в т.ч. химически связанные с фосфором) в большей части сохранились в ретентате.

3.3. Исследование аминокислотного состава и биологической ценности гидролизатов сывороточных белков

Потенциальная ценность гидролизатов сывороточных белков заключается не только в проявлении биофункциональных свойств, но и в сбалансированности аминокислотного профиля, способного обеспечить метаболические потребности организма в незаменимых аминокислотах [62–64]. Первоначально интактные белки молочной сыворотки содержат полный спектр незаменимых (валин, изолейцин, лейцин, лизин, метионин, треонин, триптофан и фенилаланин) и условно незаменимых (аргинин и гистидин) аминокислот, а также высокую концентрацию аминокислот с разветвленной цепью (BCAA), которые являются важными факторами роста и восстановления тканей [65]. Однако доказано, что под действием технологических факторов процесса таргетированной биоконверсии аминокислотный профиль гидролизованных белков может претерпевать некоторые изменения [30]. Таким образом, дальнейшие исследования были направлены на оценку сбалансированности аминокислотного профиля гидролизованных сывороточных белков в сравнительном аспекте с концентратами нативных и термоденатурированных сывороточных белков (Рисунок 3).

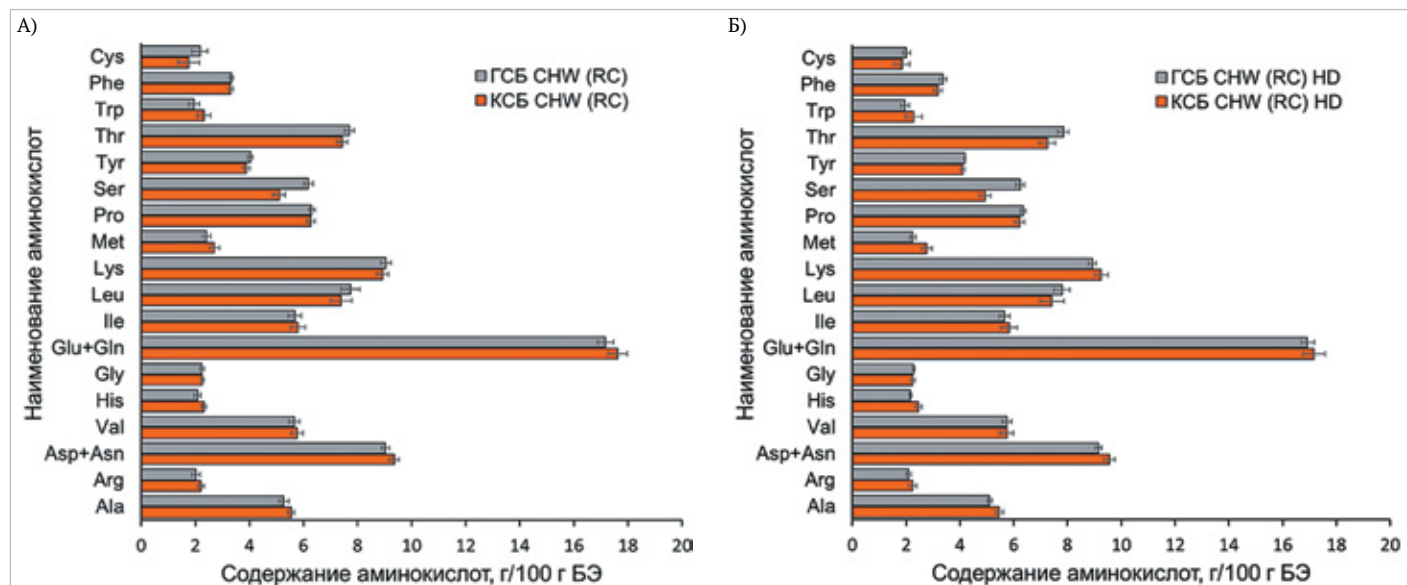


Рисунок 3. Исследование общего содержания аминокислот в сухих концентратах и гидролизатах нативных (А) и термоденатурированных сывороточных белков (Б)

Figure 3. Study of the total amino acid content in dry concentrates and hydrolysates of native (A) and heat-denatured (B) whey proteins

Проведенный анализ аминокислотного состава нативных и термоденатурированных белков молочной сыворотки, а также их гидролизатов после мембранной очистки демонстрирует высокую стабильность белково-пептидной матрицы к применяемым технологическим воздействиям. Сравнение нативного (СНВ (RC)) и термоденатурированного (СНВ (RC) HD) КСБ выявило отсутствие статистически значимых изменений в содержании подавляющего большинства аминокислот. Данный результат подтверждает, что предварительная термическая обработка, необходимая для денатурации белка, не индуцирует масштабного разрушения ковалентных пептидных связей или боковых радикалов аминокислот и не изменяет аминокислотный профиль сывороточных белков. Основным следствием термоденатурации является изменение конформационной структуры белка, заключающееся в разрывании полипептидных цепей с последующей их агрегацией, что подтверждается современными и ретроспективными исследованиями [66–68]. Наиболее выраженные изменения аминокислотного профиля наблюдались для предварительного денатурированного субстрата после ферментативного гидролиза и мембранного фракционирования. В гидролизате СНВ (RC) HD по сравнению с термоденатурированным белком отмечено значимое снижение метионина (на 18,8%), триптофана (на 14,5%), аланина (на 6,9%), аспаргина и аспаргиновой кислоты (на 4,2%). Наблюдаемое снижение концентрации триптофана и метионина при ферментативном гидролизе термоденатурированных белков, в отличие от других образцов, вероятно, является следствием их окислительной модификации на стадии предварительной термической обработки. В нативном состоянии многие чувствительные остатки метионина и триптофана расположены внутри гидрофобных участков белковой молекулы, что обеспечивает стерическую защиту от окисления [69,70]. В то же время сообщалось [66], что остатки цистеина могут нейтрализовать большую часть активных окислителей. Вследствие этого они подвергаются окислительно-опосредованной перегруппировке и образованию дисульфидных связей, участвующих в агрегации белка, которая, в свою очередь, обеспечивает физическую защиту от окисления. Наблюдаемое снижение содержания аланина, аспаргина и аспаргиновой кислоты при ферментативном гидролизе термоденатурированных белков в условиях щелочного рН с высокой вероятностью связано с их участием в реакции Майяра, где α-аминогруппа этих аминокислот может напрямую взаимодействовать с карбонильными группами редуцирующих сахаров и вступать в неферментативное гликозилирование. Процесс сопровождается образованием меланоидиновых соединений, устойчивых к кислотному гидролизу (при пробоподготовке) [71]. Установленное статистически значимое увеличение массовой доли серина в ферментативных гидролизатах СНВ (RC) и СНВ (RC) HD может отражать селективное удержание серина (в т.ч. в составе короткоцепочечных пептидов) в ретентате, обусловленное его специфической сорбцией на полимерной мембране через образование слабых водородных связей между гидроксильной группой аминокислоты и полярными функ-

циональными группами мембраны. Оно также может отражать совокупную систематическую погрешность анализа, возникающую из-за дифференциальной деградации серина при кислотном гидролизе интактного белка и пептидов, матрикс-зависимых вариаций эффективности дериватизации и электрофоретического поведения в капиллярном электрофорезе. Выявленный феномен статистически значимого увеличения содержания серина в гидролизатах требует проведения дополнительных глубоких исследований для установления достоверных механизмов, лежащих в основе наблюдаемого явления.

На следующем этапе работ было изучено содержание аминокислот в свободной форме в дегидратированных образцах концентратов и гидролизатов сывороточных белков (Рисунок 4).

Данные Рисунок 4 свидетельствуют о том, что на долю свободных аминокислот КСБ СНВ (RC) и СНВ (RC) HD приходится 0,41–0,47% от общего содержания аминокислот, в то время как для соответствующих гидролизатов данный показатель составляет 2,44–2,59%. Гидролиз нативных и термоденатурированных сывороточных белков привел к значительному увеличению концентраций фенилаланина, тирозина, пролина, метионина и в меньшей степени триптофана, лейцина, изолейцина, серина и аланина. Наблюдаемое значимое увеличение содержания свободных аминокислот коррелирует с научными данными о субстратной специфичности используемых ферментов. Согласно данным [72–75], химотрипсин проявляет высокую специфичность к гидролизу пептидных связей по С-концевым ароматическим аминокислотам (фенилаланин, тирозин, триптофан), а также умеренную специфичность к гидролизу связей после гидрофобных остатков (лейцин, пролин и метионин). Субтилизин, напротив, демонстрирует более широкую специфичность, эффективно гидролизует пептидные связи после ароматических и алифатических гидрофобных остатков (лейцин, фенилаланин, триптофан, метионин, валин) [72–74]. При этом следует отметить, что содержание горьких свободных аминокислот (триптофан, изолейцин, лейцин, валин, фенилаланин и лизин [76]) в гидролизатах СНВ (RC) и СНВ (RC) HD составляет в среднем 1,2%, что частично обуславливает интенсивность горького привкуса. Несмотря на это, относительно низкое содержание свободных аминокислот в гидролизатах сывороточных белков обусловлено, с одной стороны, специфичностью ферментов и рациональными режимами протеолиза, а с другой — применением селективной мембранной очистки гидролизатов.

По усредненным данным аминокислотного профиля проведено исследование биологической ценности концентратов и гидролизатов сывороточных белков (Таблица 3).

В целом установленные вариации аминокислот не отразились на отношениях НАК/ЗАК (0,77–0,78) и НАК/ОАК (0,44). Содержание аминокислот с разветвленными боковыми цепями для всех образцов также находилось на высоком уровне (18,95–19,20 г/100 г белка). Анализ аминокислотного состава сухих концентратов и гидролизатов сывороточных белков в сравнении с «идеальным» белком по шкале ФАО/ВОЗ [77], принятой в 2013 г., показал, что величины

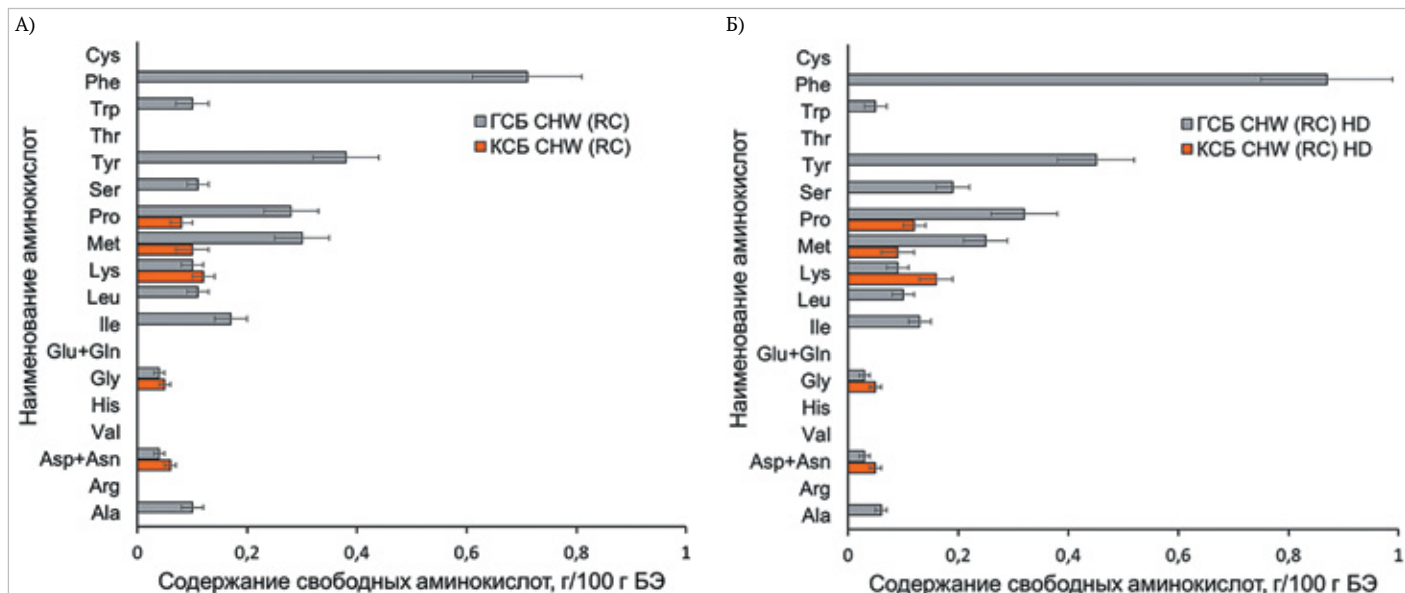


Рисунок 4. Исследование содержания свободных аминокислот в сухих концентратах и гидролизатах нативных (А) и термоденатурированных сывороточных белков (Б)

Figure 4. Study of the free amino acid content in dry concentrates and hydrolysates of native (A) and heat-denatured (B) whey proteins

Таблица 3. Биологическая ценность сухих концентратов и гидролизатов сывороточных белков

Table 3. Biological value of dry concentrates and hydrolysates of whey proteins

Наименование аминокислоты	Сухой КСБ CHW (RC)	Сухой ГСБ CHW (RC)	Сухой КСБ CHW (RC) HD	Сухой ГСБ CHW (RC) HD
Сумма незаменимых аминокислот (НАК)	43,65	43,51	43,74	43,52
Сумма заменимых аминокислот (ЗАК)	56,35	56,49	56,26	56,48
Сумма аминокислот с разветвленными боковыми цепями (ВСАА)	18,95	19,07	19,00	19,20
Отношение НАК/ЗАК	0,78	0,77	0,78	0,77
Отношение НАК/ОАК	0,44	0,44	0,44	0,44
Аминокислотный скор, %				
Валин	144,0	141,3	143,6	143,6
Изолейцин	193,5	189,4	194,4	188,6
Лейцин	121,1	126,8	121,7	127,8
Лизин	185,9	188,5	193,0	185,8
Метионин+ Цистеин	194,4	199,2	200,8	185,3
Треонин	297,0	307,5	290,0	313,4
Гистидин	144,8	130,2	154,0	134,4
Триптофан	351,1	296,7	344,9	296,1
Фенилаланин + Тирозин	176,1	179,5	177,5	184,1
Лимитирующая аминокислота	-	-	-	-
Коэффициент утилитарности	0,68	0,71	0,69	0,72
Избыточность незаменимых аминокислот, г/100 г белка	16,42	14,95	16,79	14,72
Сопоставимая избыточность, аминокислот г/100 г белка	13,56	11,79	13,80	11,51
Индекс незаменимых аминокислот (ИНАК)	1,49	1,49	1,49	1,49

химических и скорректированных на общую переваримость скоров для всех незаменимых аминокислот превышают 100%. Рассчитанные коэффициенты утилитарности, отражающие общее количество НАК, которые могут быть утилизированы организмом человека, для гидролизатов CHW (RC) и CHW (RC) HD находились на схожем уровне (0,71–0,72) и превышали показатели соответствующих концентратов (0,68–0,69). Количество незаменимых аминокислот, гипотетически не пошедших на анаболические нужды организма, для гидролизатов CHW (RC) и CHW (RC) HD составляло 14,95 и 14,72 г/100 г белка, в то время как для интактных сывороточных белков данный показатель находился на уровне 16,42 и 16,79 г/100 г белка. Показатель сопоставимой избыточности для гидролизованых белков составлял в среднем 11,79–11,51 г/100 г белка, а для концентратов – 13,56–13,80 г/100 г белка при схожем индексе незаменимых аминокислот. Таким образом, по результатам исследований установлено, что гидролизаты сывороточных белков обладают высокой биологической ценностью и сбалансированностью по незаменимым аминокислотам,

а также являются естественным источником аминокислот с разветвленной боковой цепью. В перспективе это может стать одним из инструментов для решения ряда актуальных проблем современной нутрициологии.

3.4. Оценка перевариваемости гидролизатов сывороточных белков

Оценка перевариваемости белковых ингредиентов *in vitro* является критически важным этапом для их характеристики с точки зрения усвояемости. Исследование деградации концентратов сывороточных белков и их гидролизатов в процессе пищеварения проводили с использованием статической модели переваривания INFOGEST 2.0, включающей пероральную (Р. с.), желудочную (Ж. с.) и кишечную (К. с.) фазы пищеварения, с учетом физиологических данных о составе сред взрослого человека (электролиты, ферменты, желчь, степень разбавления, pH и время пищеварения и пр.). Динамика гидролиза белка отслеживалась методом электрофореза в полиакриламидном геле на каждой стадии пищеварения (Рисунок 5).

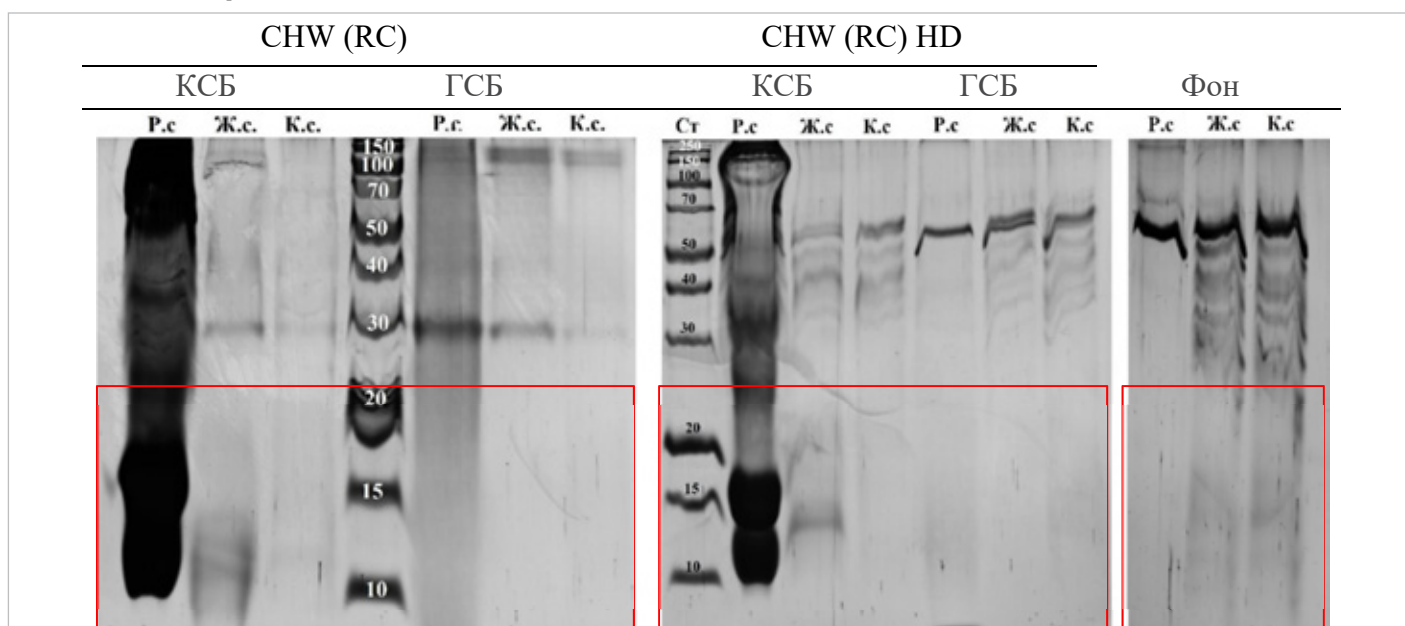


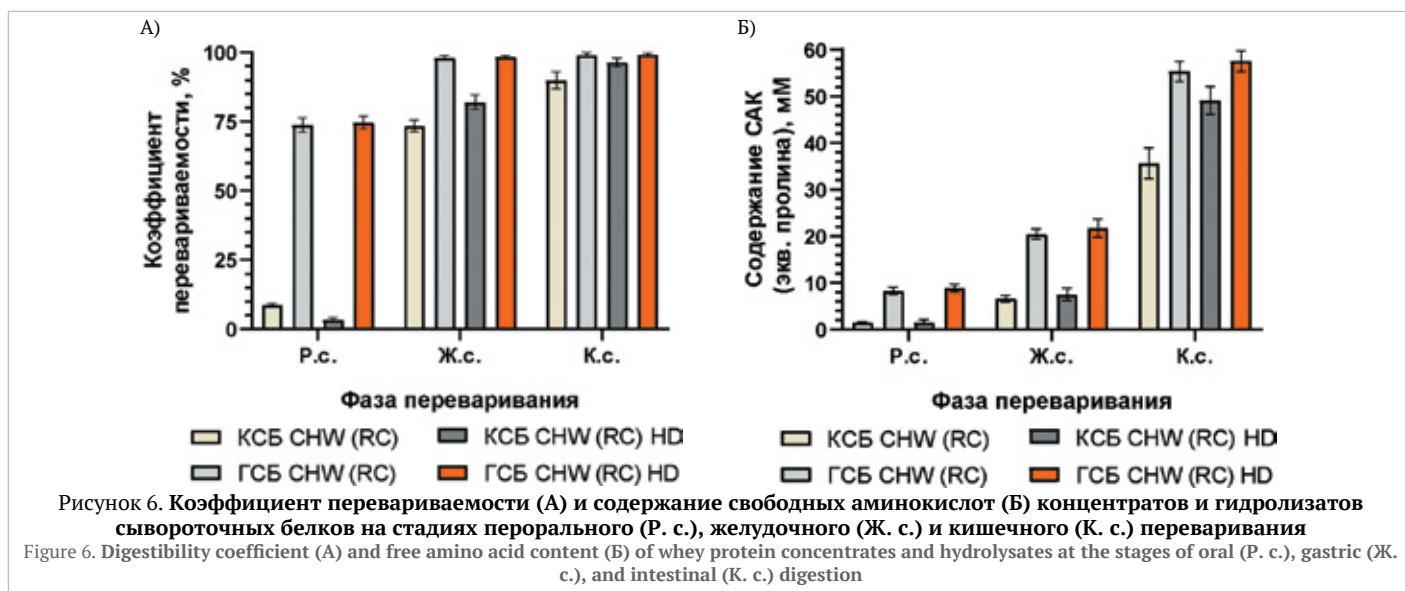
Рисунок 5. Электрофореграмма продуктов деградации концентратов и гидролизатов сывороточных белков на стадиях перорального (Р. с.), желудочного (Ж. с.) и кишечного (К. с.) переваривания

Figure 5. Electropherogram of degradation products of whey protein concentrates and hydrolysates at the stages of oral (P. c.), gastric (Ж. c.), and intestinal (K. c.) digestion

Анализ данных Рисунка 5 показал отсутствие на пероральной фазе переваривания протеолитической деградации нативных и термоденатурированных сывороточных белковых структур, что подтверждается сохранением четких и интенсивных полос, соответствующих основным сывороточным белкам — β-лактоглобулину (18 кДа) и α-лактальбумину (14 кДа). Отсутствие видимых изменений в белковом профиле на данной стадии является следствием того, что фермент α-амилаза, используемый для имитации пероральной фазы, не обладает протеолитической активностью и, преимущественно, гидролизует α-1,4-гликозидные связи в крахмале и гликогене. Электрофореграммы гидролизованных белков характеризуются отсутствием полос в зоне, характерной для основных интактных белков, что подтверждает деградацию белковых структур на этапе ферментативного протеолиза и удаление высокомолекулярных соединений на стадии каскадно-селективной фильтрации гидролизатов. После инкубации с пепсином в условиях желудочной фазы отмечено практически полное исчезновение полос β-лактоглобулина и частичное α-лактальбумина, что свидетельствует об эффективном протеолизе под действием пепсина. Сформированный диффузный спектр полос в области молекулярных масс менее 15 кДа может свидетельствовать как о сохранении незначительных концентраций негидролизованного α-лактальбумина, так и об образовании гетерогенной смеси пептидов с различной молекулярной массой, что также подчеркивается в работе [78]. Таким образом, пепсин, являясь эндопептидазой, осуществляет первичный гидролиз белковых субстратов на среднемoleкулярные и короткие пептиды. Последующая обработка панкреатином на кишечной фазе переваривания приводила к полному исчезновению пептидных и белковых полос. Это свидетельствует о глубоком гидролизе пептидов, полученных после желудочной стадии с образованием коротких олигопептидов и свободных аминокислот под действием комплекса панкреатических протеаз (трипсина, химотрипсина, карбоксипептидаз). Важно отметить, что существенных изменений в профилях гидролизатов нативных и сывороточных белков не наблюдалось уже на этапе пероральной фазы переваривания. Таким образом, для углубленного изучения деградации белковых соединений в желудочно-кишечном тракте *in vitro* были исследованы показатели коэффициента перевариваемости (Рисунок 6А) и образования свободных аминокислот (Рисунок 6Б).

Результаты исследования демонстрируют выраженное влияние предварительной обработки на перевариваемость сывороточных белков *in vitro*. Гидролизаты нативных и термоденатурированных сывороточных белков обладали высокой биодоступностью уже на стадии перорального пищеварения, что объясняется предварительным расщеплением пептидных связей в результате протеолиза ферментами. Дальнейшее переваривание в желудочно-кишечном тракте обеспечило практически полное расщепление данных образцов на желудочной (98,0% и 98,4%) и кишечной стадиях (99,0% и 99,1%) с образованием короткоцепочечных пептидов, не осаждаемых трихлоруксусной кислотой, и свободных аминокислот. В отличие от гидролизатов, нативная форма сывороточных белков показала классическую трехстадийную динамику

переваривания, где основные процессы деградации происходили при имитации желудочной (73,3%) и кишечной фаз (89,9%). Предварительная термоденатурация ускоряла процесс деградации белка при имитации желудочной (82,0%) и кишечной фаз (96,3%), что объясняется повышенной доступностью аминокислотных сайтов для расщепления пищеварительными ферментами посредством изменения конформации белка. Полученные данные полностью согласуются с результатами работ [79,80], где также показано, что нативная глобулярная структура β-лактоглобулина, характеризующаяся наличием β-барреля с гидрофобным ядром и стабилизированная дисульфидными мостиками (Cys⁶⁶-Cys¹⁶⁰, Cys¹⁰⁶-Cys¹¹⁹), существенно ограничивает доступ протеаз к пептидным связям. Данный факт объясняет неполный протеолиз нативной белковой молекулы пищеварительными ферментами. Как и в указанных исследованиях, нами было подтверждено, что термоденатурация белка значительно повышает доступность пептидных связей для действия пепсина и последующих панкреатических протеаз. Это является следствием необратимого изменения конформации белковой молекулы, включающего развертывание полипептидной глобулы, экспозицию гидрофобных участков, ранее скрытых внутри молекулы, и разрыв дисульфидных связей, стабилизирующих нативную структуру. Анализ высвобождения свободных аминокислот при имитации гастроинтестинального переваривания *in vitro* позволил выявить статистически значимые различия в кинетике переваривания между исследуемыми формами сывороточных белков. Гидролизаты нативных и термоденатурированных сывороточных белков в силу предварительного протеолиза демонстрировали наивысшую концентрацию свободных аминокислот на желудочной фазе (20,4 и 21,7 мМ экв. пролина) и кишечной фазе переваривания (55,3 и 57,5 мМ экв. пролина) по сравнению с соответствующими интактными белками на завершающем этапе процесса (35,6 и 49,1 мМ экв. пролина). Ключевым наблюдением являлось снижение коэффициента эффективности высвобождения свободных аминокислот (САК_{ж.с./САК_{к.с.}}) у гидролизованных форм до 2,7 против 5,4 для нативных белков и 6,5 для термоденатурированных белков, что может объясняться образованием протеазо-резистентных пептидных фракций. Проведенный анализ подтверждает, что *in vitro* переваривание сывороточных белков не приводит к их полному гидролизу до свободных аминокислот. Значительная часть протеолиза на кишечной фазе завершается образованием короткоцепочечных пептидов (в т.ч. биоактивных), способных к кишечной абсорбции через мембранные транспортеры либо к последующему гидролизу ферментами щеточной каймы энтероцитов и микробиоты. Таким образом, совокупность полученных данных убедительно доказывает, что гидролизованные белки обладают ускоренной кинетикой переваривания по сравнению с нативными формами. Однако требуется проведение дополнительных исследований на лабораторных моделях животных *in vivo*. Такие работы необходимы для подтверждения устойчивости антиоксидантных и АПФ-ингибирующих пептидов к системной деградации в результате переваривания в желудочно-кишечном тракте, количественной оценки их транспортируемого транспорта и доказательства биологических эффектов.



4. Выводы

Реализованная в работе стратегия каскадно-селективной мембранной фильтрации (ультрафильтрация с последующей нанофильтрацией) представляет комплексное решение для очистки гидролизатов сывороточных белков от балластных соединений (негидролизованные высокомолекулярные белковые соединения, протеазы и частично свободные аминокислоты) и для фракционирования пептидов с прогнозируемой биологической активностью. Доказано, что предложенная технология обеспечивает селективное удаление до 67 % ионов калия и 61 % натрия при сохранении в продукте физиологически значимых уровней кальция, магния и фосфора. Ключевым результатом исследований является сохранение в гидролизате сывороточных белков пептидных фракций (0,4–5 кДа), обладающих максимальной антиоксидантной (до 1280 мкМ ТЭ/г) и АПФ-ингибирующей (IC₅₀=0,10–0,19 мг/мл) активностями. Комплексный анализ аминокислотного состава подтвердил, что мембранная обработка не приводит к значительному изменению аминокислотного состава гидролизатов сывороточных белков. Гидролизаты характеризуются сбалансированным профилем незаменимых аминокислот (соотношение НАК/ЗАК 0,77–0,78), высоким содержанием ВСАА (19,07–

19,20 г/100 г белка), повышенным коэффициентом утилитарности (0,71–0,72) и пониженным показателем сопоставимой избыточности НАК (11,79–11,51 г/100 г белка) по сравнению с нативными термоденатурированными концентратами сывороточных белков. При этом на долю свободных аминокислот приходится 2,44–2,59% от общего содержания аминокислот. Оценка перевариваемости с использованием статической модели переваривания INFOGEST 2.0 подтвердила более быстрое и полное переваривание, а также максимальное высвобождение свободных аминокислот из фракционированных гидролизатов по сравнению с концентратами интактных белков, что может способствовать ускорению процессов метаболизма и восстановлению организма после интенсивных физических нагрузок.

Полученные результаты открывают перспективы промышленного масштабирования технологии производства гидролизатов сывороточных белков и их использования в качестве функциональных ингредиентов для создания продуктов функционального и специализированного питания, включая протеиновые формулы для спортивного питания, нутритивной поддержки при метаболическом синдроме и возрастной саркопении, для коррекции хронического оксидативного стресса и профилактики гипертонии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Meganaharshini, M., Sudhakar, V., Dhivya Bharathi, N., Deepak, S. (2023). Review on recent trends in the application of protein concentrates and isolates — A food industry perspective. *Food and Humanity*, 1, 308–325. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.05.022>
- Lagrange, V., Whitsett, D., Burris, C. (2015). Global market for dairy proteins. *Journal of Food Science*, 80(1), A16–A22. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12801>
- Smithers, G. W. (2015). Whey-ing up the options — Yesterday, today and tomorrow. *International Dairy Journal*, 48, 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2015.01.011>
- Dullius, A., Goettert, M. I., de Souza, C. F. V. (2018). Whey protein hydrolysates as a source of bioactive peptides for functional foods — Biotechnological facilitation of industrial scale-up. *Journal of Functional Foods*, 42, 58–74. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.063>
- Pan, D., Zhang, Z., Liu, N., Ashaolu, T. J. (2025). Whey protein nutrition in sports: Action mechanisms and gaps in research. *Current Nutrition Reports*, 14(1), Article 84. <https://doi.org/10.1007/s13668-025-00673-w>
- González-Weller, D., Paz-Montelongo, S., Bethencourt-Barbuzano, E., Niebla-Canelo, D., Alejandro-Vega, S., Gutiérrez, Á. J. et al. (2023). Proteins and minerals in whey protein supplements. *Foods*, 12(11), Article 2238. <https://doi.org/10.3390/foods12112238>
- Lam, F. C., Bukhsh, A., Rehman, H., Waqas, M. K., Shahid, N., Khaliel, A. M. et al. (2019). Efficacy and safety of whey protein supplements on vital sign and physical performance among athletes: A network meta-analysis. *Frontiers in Pharmacology*, 10, Article 317. <https://doi.org/10.3389/fphar.2019.00317>
- Martinez Galan, B. S., Giolo De Carvalho, F., Carvalho, S. C., Cunha Brandao, C. F., Morhy Terrazas, S. I., Abud, G. F. et al. (2021). Casein and whey protein in the breast milk ratio: Could it promote protein metabolism enhancement in physically active adults? *Nutrients*, 13(7), Article 2153. <https://doi.org/10.3390/nu13072153>
- Zhao, C., Chen, N., Ashaolu, T. J. (2022). Whey proteins and peptides in health-promoting functions—A review. *International Dairy Journal*, 126, Article 105269. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105269>
- Camargo, L.R., Donedá, D., Oliveira, V. R. (2020). Whey protein ingestion in elderly diet and the association with physical, performance and clinical outcomes. *Experimental Gerontology*, 137, Article 110936. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2020.110936>
- Polberger, S., Rähä, N. C., Juvenon, P., Moro, G. E., Minoli, I., Warm, A. (1999). Individualized protein fortification of human milk for preterm infants: Comparison of ultrafiltered human milk protein and a bovine whey fortifier. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 29(3), 332–338. <https://doi.org/10.1002/j.1536-4801.1999.tb02424.x>
- de Figueiredo Furtado, G., da Silva Carvalho, A. G., Hubinger, M. D. (2021). Model infant formulas: Influence of types of whey proteins and oil composition on emulsion and powder properties. *Journal of Food Engineering*, 292, Article 110256. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110256>
- Chen, Y., Callanan, M., Shanahan, C., Tobin, J., Gamon, L. F., Davies, M. J. et al. (2021). The use of membrane filtration to increase native whey proteins in infant formula. *Dairy*, 2(4), 515–529. <https://doi.org/10.3390/dairy2040041>
- Chitti, W., Insin, P., Prueksaritanond, N. (2025). Effect of whey protein supplementation on postoperative outcomes after gynecological cancer surgery: A randomized controlled trial. *World Journal of Oncology*, 16(1), 70–82. <https://doi.org/10.14740/wjon1990>
- Khaloofefard, R., Oraee-Yazdani, S., Keikhaee, M., Shariatpanahi, Z. V. (2022). Protein supplement and enhanced recovery after posterior spine fusion surgery: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Clinical Spine Surgery*, 35(3), E356–E362. <https://doi.org/10.1097/BSD.0000000000001222>
- Niitsu, M., Ichinohe, D., Hirooka, T., Mitsutomi, K., Morimoto, Y., Sarukawa, J. et al. (2016). Effects of combination of whey protein intake and rehabilitation on muscle strength and daily movements in patients with hip fracture in the early postoperative period. *Clinical Nutrition*, 35(4), 943–949. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2015.07.006>
- Kleekayai, T., O'Neill, A., Clarke, S., Holmes, N., O'Sullivan, B., FitzGerald, R. J. (2022). Contribution of hydrolysis and drying conditions to whey protein hydrolysate characteristics and in vitro antioxidant properties. *Antioxidants*, 11(2), Article 399. <https://doi.org/10.3390/antiox11020399>
- Pang, L., Huang, Z., Li, R., Su, Y., Shi, J., Yang, X. et al. (2025). Reducing the allergenicity of whey proteins while improving their functional properties and bioactivity using combined enzymes. *Food Chemistry*, 481, Article 144052. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144052>
- Kruchinin, A., Barkovskaya, I., Illarionova, E., Bolshakova, E., Turovskaya, S., Galstyan, A. (2025). Effect of enzymatic degradation of proteins on technological properties of whey powdered products. *International Journal of Dairy Technology*, 78(2), Article e70005. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.70005>
- Cui, Q., Li, Y., Li, T., Yu, J., Shen, G., Sun, X. et al. (2024). Characterization of peptide profiles and the hypoallergenic and high antioxidant activity of whey protein hydrolysate prepared using different hydrolysis modes. *Foods*, 13(18), Article 2978. <https://doi.org/10.3390/foods13182978>
- Espindola, J. S., Taccola, M. F., da Silva, V. S. N., Dos Santos, L. D., Rossini, B. C., Mendonca, B. C. et al. (2023). Digestion-resistant whey peptides promote antioxidant effect on Caco-2 cells. *Food Research International*, 173, Article 113291. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113291>
- Cui, L., Yang, G., Lu, S., Zeng, X., He, J., Guo, Y. et al. (2022). Antioxidant peptides derived from hydrolyzed milk proteins by *Lactobacillus* strains: A BIOPEP-UWM database-based analysis. *Food Research International*, 156, Article 111339. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111339>
- Jiang, S., Mo, F., Li, W., Yang, S., Li, C., Jiang, L. (2024). Deep learning-driven optimization of antihypertensive properties from whey protein hydrolysates: A multienzyme approach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(2), 1373–1388. <https://doi.org/10.1016/10.1021/acs.jafc.4c10830>
- Dou, P., Li, X., Zou, X., Wang, K., Yao, L., Sun, Z. et al. (2024). Antihypertensive effects of whey protein hydrolysate involve reshaping the gut microbiome in spontaneously hypertensive rats. *Food Science and Human Wellness*, 13(4), 1974–1986. <https://doi.org/10.26599/FSHW.2022.9250164>
- Mansinbhai, C. H., Sakure, A., Liu, Z., Maurya, R., Das, S., Basaiawmoit, B. et al. (2023). Anti-inflammatory, ACE inhibitory, antioxidative activities and release of novel antihypertensive and antioxidative peptides from whey protein hydrolysate with molecular interactions. *Journal of the American Nutrition Association*, 42(4), 371–385. <https://doi.org/10.1080/07315724.2022.2052201>
- Tovar-Jiménez, X., Téllez-Jurado, A., Gómez-Aldapa, C. A., Mercado-Flores, Y., Arana-Cuenca, A. (2021). Antioxidant and antihypertensive activity of bovine whey protein concentrate enzymatic hydrolysates. *Biotechnia*, 23(1), 161–169. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i1.1321>
- Alvarez-Chávez, S. I., Reyes-Ramírez, I., González-Olivares, L. G., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Olvera-Rosales, L. B. et al. (2025). Hydrolysates from a whey protein concentrate are a promising functional ingredient for diabetes control via DPP-IV inhibition. *Biology and Life Sciences Forum*, 40(1), Article 10. <https://doi.org/10.3390/blsf2024040010>
- Bunsroem, K., Prinyawiwatkul, W., Thaidum, S. (2022). The influence of whey protein heating parameters on their susceptibility to digestive enzymes and the antidiabetic activity of hydrolysates. *Foods*, 11(6), Article 829. <https://doi.org/10.3390/foods11060829>
- Vadher, K. R., Sakure, A. A., Mankad, P. M., Rawat, A., Bishnoi, M., Kondepudi, K. K. et al. (2025). A comparative study on antidiabetic and anti-inflammatory activities of fermented whey and soy protein isolates and the release of biofunctional peptides: An in vitro and in silico studies. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 105(7), 3826–3842. <https://doi.org/10.1002/jsfa.14154>
- Li, Y., Fan, Y., Liu, J., Meng, Z., Huang, A., Xu, F. et al. (2023). Identification, characterization and in vitro activity of hypoglycemic peptides in whey hydrolysates from rubbing cheese by-product. *Food Research International*, 164, Article 112382. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112382>
- Singh, A., Duche, R. T., Wandhare, A. G., Sian, J. K., Singh, B. P., Sihag, M. K. et al. (2023). Milk-derived antimicrobial peptides: Overview, applications, and future perspectives. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 15(1), 44–62. <https://doi.org/10.1007/s12602-022-10004-y>
- Innocente, N., Calligaris, S., Di Filippo, G., Melchior, S., Marino, M., Nicoli, M. C. (2023). Process design for the production of peptides from whey protein isolate with targeted antimicrobial functionality. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(5), 2505–2517. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16393>

33. Dalaka, E., Stefos, G. C., Politis, I., Theodorou, G. (2025). Immunomodulatory properties of sweet whey-derived peptides in THP-1 macrophages. *Molecules*, 30(6), Article 1261. <https://doi.org/10.3390/molecules30061261>
34. Kiewiet, M. B., Dekkers, R., Ulfman, L. H., Groeneveld, A., de Vos, P., Faas, M. M. (2018). Immunomodulating protein aggregates in soy and whey hydrolysates and their resistance to digestion in an in vitro infant gastrointestinal model: New insights in the mechanism of immunomodulatory hydrolysates. *Food Function*, 9(1), 604–613. <https://doi.org/10.1039/C7FO01537B>
35. Reyes-Díaz, A., González-Córdova, A. F., Hernández-Mendoza, A., Reyes-Díaz, R., Vallejo-Cordoba, B. (2018). Immunomodulation by hydrolysates and peptides derived from milk proteins. *International Journal of Dairy Technology*, 71(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/1471-0507.12421>
36. Mora, L., Toldrá, F. (2023). Advanced enzymatic hydrolysis of food proteins for the production of bioactive peptides. *Current Opinion in Food Science*, 49, Article 100973. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100973>
37. Martínez-Araiza, G., Castaño-Tostado, E., Amaya-Llano, S. L., Regalado-González, C., Martínez-Vera, C., Ozimek, L. (2012). Modeling of enzymatic hydrolysis of whey proteins. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2596–2601. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0624-5>
38. Morifuji, M., Ishizaka, M., Baba, S., Fukuda, K., Matsumoto, H., Koga, J. et al. (2010). Comparison of different sources and degrees of hydrolysis of dietary protein: Effect on plasma amino acids, dipeptides, and insulin responses in human subjects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(15), 8788–8797. <https://doi.org/10.1021/jf101912n>
39. Boza, J. J., Moennoz, D., Vuichoud, J., Jarret, A. R., Gaudard-de-Weck, D., Balleve, O. (2000). Protein hydrolysate vs free amino acid-based diets on the nutritional recovery of the starved rat. *European Journal of Nutrition*, 39(6), 237–243. <https://doi.org/10.1007/s003940070001>
40. Douwes, J., Thorne, P., Pearce, N., Heederik, D. (2003). Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects. *Annals of Occupational Hygiene*, 47(3), 187–200. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meg032>
41. Yike, I. (2011). Fungal proteases and their pathophysiological effects. *Mycopathology*, 171(5), 299–323. <https://doi.org/10.1007/s11046-010-9386-2>
42. Henriques, M., Gomes, D., Pereira, C. (2017). Liquid whey protein concentrates produced by ultrafiltration as primary raw materials for thermal dairy gels. *Food Technology and Biotechnology*, 55(4), Article 454. <https://doi.org/10.17113/ftb.55.04.17.5248>
43. Курченко, В. П., Симоненко, Е. С., Сушинская, Н. В., Головач, Т. Н., Петров, А. Н., Симоненко, С. В. (2021). Идентификация кобыльего молока и его смеси с коровьим молоком методом ВЭЖХ-анализа. *Техника и технология пищевых производств*, 51(2), 402–412. [Kurchenko, V. P., Simonenko, E. S., Sushynskaya, N. V., Halavach, T. N., Petrov, A. N., Simonenko, S. V. (2021). HPLC identification of mare's milk and its mix with cow's milk. *Food Processing: Techniques and Technology*, 51(2), 402–412. (In Russian)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-402-412>
44. Spellman, D., McEvoy, E., O'cuinn, G., FitzGerald, R. J. (2003). Proteinase and exopeptidase hydrolysis of whey protein: Comparison of the TNBS, OPA and pH stat methods for quantification of degree of hydrolysis. *International Dairy Journal*, 13(6), 447–453. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(03\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(03)00053-0)
45. Acid, T. (1979). Determination of the degree of hydrolysis of food protein hydrolysates by trinitrobenzenesulfonic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 27(6), 1257–1262. <https://doi.org/10.1021/jf60226a042>
46. Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
47. Hernández-Ledesma, B., Martín-Álvarez, P. J., Pueyo, E. (2003). Assessment of the spectrophotometric method for determination of angiotensin-converting-enzyme activity: Influence of the inhibition type. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(15), 4175–4179. <https://doi.org/10.1021/jf034148o>
48. Araujo, M. C., Melo, R. L., Cesari, M. H., Juliano, M. A., Juliano, L., Carmona, A. K. (2000). Peptidase specificity characterization of C- and N-terminal catalytic sites of angiotensin I-converting enzyme. *Biochemistry*, 39(29), 8519–8525. <https://doi.org/10.1021/bi9928905>
49. Vafin, R. R., Radaeva, I. A., Kruchinin, A. G., Illarionova, E. E., Bigaeva, A. V., Turovskaya, S. N. et al. (2021). κ -casein polymorphism effect on technological properties of dried milk. *Foods and Raw Materials*, 9(1), 95–105. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-95-105>
50. Brodkorb, A., Egger, L., Alminger, M., Alvito, P., Assunção, R., Ballance, S. et al. (2019). INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. *Nature Protocols*, 14(4), 991–1014. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0119-1>
51. Чернуха, И. М., Васильевская, Е. Р., Арюзина, М. А., Кусай, А., Полищук, Е. К. (2023). Комплексная модель *in vitro* и *ex vivo* для изучения трансформации белков в процессе пищеварения. *Все о мясе*, 4, 40–45. [Chernukha, I. M., Vasilevskaya, E. R., Aryuzina, M. A., Qusay, A., Polishchuk, E. K. (2023). Complex in vitro and ex vivo model to study protein transformation during digestion. *Vsyo o Myase*, 4, 40–45. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2023-4-10-10>
52. Neelima, Sharma, R., Rajput, Y. S., Mann, B. (2013). Chemical and functional properties of glycomacropeptide (GMP) and its role in the detection of cheese whey adulteration in milk: A review. *Dairy Science Technology*, 93(1), 21–43. <https://doi.org/10.1007/s13594-012-0095-0>
53. Feeney, S., Joshi, L., Hickey, R. M. (2018). Biological roles and production technologies associated with bovine glycomacropeptide. Chapter in a book: *Novel Proteins for Food, Pharmaceuticals and Agriculture: Sources, Applications and Advances*. Wiley-Blackwell, 2018. <https://doi.org/10.1002/9781119385352.ch1>
54. Kolar, C. W., Brunner, J. R. (1970). Proteose-peptone fraction of bovine milk: Lactate serum components 5 and 8-casein-associated glycoproteins. *Journal of Dairy Science*, 53(8), 997–1008. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(70\)86335-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(70)86335-4)
55. Karamoko, G., Anihouvi, P., Blecker, C. (2015). The development of knowledge regarding the characteristics of the proteose peptone fraction of milk: Technological and biological properties. A review. *Biotechnology, Agronomy, and Society and Environment*, 17(2), 373–382.
56. Alavi, F., Ciftci, O. N. (2023). Purification and fractionation of bioactive peptides through membrane filtration: A critical and application review. *Trends in Food Science Technology*, 131, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.024>
57. Yang, G., Xing, W., Xu, N. (2003). Concentration polarization in spiral-wound nanofiltration membrane elements. *Desalination*, 154(1), 89–99. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00210-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00210-8)
58. Suwal, S., Roblet, C., Doyen, A., Amiot, J., Beaulieu, L., Legault, J. et al. (2014). Electrodialytic separation of peptides from snow crab by-product hydrolysate: Effect of cell configuration on peptide selectivity and local electric field. *Separation and Purification Technology*, 127, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.018>
59. Poulin, J.-F., Amiot, J., Bazinet, L. (2006). Simultaneous separation of acid and basic bioactive peptides by electrodialysis with ultrafiltration membrane. *Journal of Biotechnology*, 123(3), 314–328. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2005.11.016>
60. Pramanik, B. K., Thangavadivel, K., Shu, L., Jegatheesan, V. (2016). A critical review of membrane crystallization for the purification of water and recovery of minerals. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 15(3), 411–439. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9403-0>
61. Soral-Smietana, M., Zduńczyk, Z., Wronkowska, M., Juskiwicz, J., Zander, L. (2013). Mineral composition and bioavailability of calcium and phosphorus from acid whey concentrated by various membrane processes. *Journal of Elementology*, 18(1), 115–125. <https://doi.org/10.5601/ELEM.2013.18.1.10>
62. Price, D., Jackson, K. G., Lovegrove, J. A., Givens, D. I. (2022). The effects of whey proteins, their peptides and amino acids on vascular function. *Nutrition Bulletin*, 47(1), 9–26. <https://doi.org/10.1111/nbu.12543>
63. Simonson, M., Boirie, Y., Guillet, C. (2020). Protein, amino acids and obesity treatment. *Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders*, 21(3), 341–353. <https://doi.org/10.1007/s11154-020-09574-5>
64. Marshall, K. (2004). Therapeutic applications of whey protein. *Alternative Medicine Review*, 9(2), 136–156.
65. Melnik, V., Ryabinina, E., Rodionova, K., Nalivayko, L., Khimych, M. (2023). Chemical composition and amino acid profile of goose meat (Ukrainian large gray and large white breeds) in semi-intensive system of growing. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 12(6), Article e9828. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.9828>
66. Li, C., Nielsen, S. B., Engholm-Keller, K., Lund, M. N. (2022). Oxidation of whey proteins during thermal treatment characterized by a site-specific LC-MS/MS-based proteomic approach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(14), 4391–4406. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07946>
67. Halabi, A., Croguennec, T., Bouhallab, S., Dupont, D., Deglaire, A. (2020). Modification of protein structures by altering the whey protein profile and heat treatment affects in vitro static digestion of model infant milk formulas. *Food Function*, 11(8), 6933–6945. <https://doi.org/10.1039/D0FO01362E>
68. deWit, J. N., Klarenbeek, G. (1984). Effects of various heat treatments on structure and solubility of whey proteins. *Journal of Dairy Science*, 67(11), 2701–2710. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(84\)81628-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(84)81628-8)
69. Hensel, M., Steurer, R., Fichtl, J., Elger, C., Wedekind, F., Petzold, A. et al. (2011). Identification of potential sites for tryptophan oxidation in recombinant antibodies using tert-butylhydroperoxide and quantitative LC-MS. *PLoS One*, 6(3), Article e17708. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017708>
70. Aledo, J. C., Cantón, F. R., Veredas, F. J. (2015). Sulphur atoms from methionines interacting with aromatic residues are less prone to oxidation. *Scientific Reports*, 5(1), Article 16955. <https://doi.org/10.1038/srep16955>
71. Xiao, Q., Woo, M. W., Hu, J., Xiong, H., Zhao, Q. (2021). The role of heating time on the characteristics, functional properties and antioxidant activity of enzyme-hydrolyzed rice proteins-glucose Maillard reaction products. *Food Bioscience*, 43, Article 101225. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101225>
72. Nagashima, T., Watanabe, A., Kise, H. (1992). Peptide synthesis by proteases in organic solvents: Medium effect on substrate specificity. *Enzyme and Microbial Technology*, 14(10), 842–847. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(92\)90102-T](https://doi.org/10.1016/0141-0229(92)90102-T)
73. Peters, K., Pauli, D., Hache, H., Boteva, R. N., Genov, N. C., Fittkau, S. (1989). Subtilisin DY – kinetic characterization and comparison with related proteinases. *Current Microbiology*, 18(3), 171–177. <https://doi.org/10.1007/BF01569566>
74. Pattabiraman, T. N., Lawson, W. B. (1972). Comparative studies of the specificities of α -chymotrypsin and subtilisin BPN'. *Studies with flexible substrates. Biochemical Journal*, 126(3), 645–657. <https://doi.org/10.1042/bj1260645>
75. Yamawaki, Y., Yufu, T., Kato, T. (2021). The effect of a peptide substrate containing an unnatural branched amino acid on chymotrypsin activity. *Processes*, 9(2), Article 242. <https://doi.org/10.3390/pr9020242>
76. Shuai, X., Gao, L., Geng, Q., Li, T., He, X., Chen, J. et al. (2022). Effects of moderate enzymatic hydrolysis on structure and functional properties of pea protein. *Foods*, 11(15), Article 2368. <https://doi.org/10.3390/foods11152368>
77. Food and Agriculture Organization of the United Nations (Rome). (2013). *Dietary Protein Quality Evaluation in Human Nutrition: Report of an FAO Expert Consultation*, 31 March–2 April, 2011, Auckland, New Zealand. Retrieved from <https://www.fao.org/3/i3124e/i3124e.pdf>. Accessed October 2, 2022
78. Melchior, S., Moretton, M., Alongi, M., Calligaris, S., Nicoli, M. C., Anese, M. (2023). Comparison of protein *in vitro* digestibility under adult and elderly conditions: The case study of wheat, pea, rice, and whey proteins. *Food Research International*, 163, Article 112147. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112147>
79. Broersen, K. (2020). Milk processing affects structure, bioavailability and immunogenicity of β -lactoglobulin. *Foods*, 9(7), Article 874. <https://doi.org/10.3390/foods9070874>
80. Peram, M. R., Loveday, S. M., Ye, A., Singh, H. (2013). *In vitro* gastric digestion of heat-induced aggregates of β -lactoglobulin. *Journal of Dairy Science*, 96(1), 63–74. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5896>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Кручинин Александр Геннадьевич — доктор технических наук, старший научный сотрудник, экспериментальная клиника — лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: a.kruchinin@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3227-8133 * автор для контактов</p>	<p>Aleksandr G. Kruchinin, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Experimental Clinic-Laboratory of Biologically Active Substances of Animal Origin, V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhina str., 109316, Moscow, Russia E-mail: a.kruchinin@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3227-8133 * corresponding author</p>
<p>Спирина Мария Евгеньевна — инженер-исследователь, экспериментальная клиника — лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: m.spirina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4544-4433</p>	<p>Maria E. Spirina, Research Engineer, Experimental Clinic-Laboratory of Biologically Active Substances of Animal Origin, V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhina str., 109316, Moscow, Russia E-mail: m.spirina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4544-4433</p>
Критерии авторства	Contribution
<p>Концептуализация — Кручинин А. Г.; Обработка данных — Кручинин А. Г., Спирина М. Е.; Формальный анализ — Кручинин А. Г.; Исследование — Кручинин А. Г., Спирина М. Е.; Методология — Кручинин А. Г.; Администрирование проекта — Кручинин А. Г.; Ресурсы — Кручинин А. Г.; Визуализация — Кручинин А. Г., Спирина М. Е.; Написание, рецензирование и редактирование текста — Кручинин А. Г.</p>	<p>Conceptualization — Kruchinin A. G.; Data curation — Kruchinin A. G., Spirina M. E.; Formal analysis — Kruchinin A. G.; Investigation — Kruchinin A. G., Spirina M. E.; Methodology — Kruchinin A. G.; Project administration — Kruchinin A. G.; Resources — Kruchinin A. G.; Visualization — Kruchinin A. G., Spirina M. E.; Writing — original draft, review & editing — Kruchinin A. G.</p>
Конфликт интересов	Conflict of interest
<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>	<p>The authors declare no conflict of interest</p>

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-44-53>



Поступила 23.09.2025

Поступила после рецензирования 27.02.2026

Принята в печать 03.03.2026

© Колпакова В. В., Гайворонская И. С., Гулакова В. А., Семенов Г. В., Цурикова Н. В., Сеницын А. П., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ФЕРМЕНТАТИВНЫЙ СИНТЕЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ И ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Колпакова В. В.^{1*}, Гайворонская И. С.¹, Гулакова В. А.¹, Семенов Г. В.², Цурикова Н. В.³, Сеницын А. П.^{4,5}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха, Красково, Московская область, Россия

²Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия

⁴Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук, Москва, Россия

⁵Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

пшеничная
клеяковина,
гороховый
концентрат,
подсолнечный
концентрат,
биосинтез,
параметры,
оптимизация,
свойства,
модификация

Функциональные свойства растительных белковых концентратов часто не отвечают требованиям, предъявляемым к ним специалистами пищевой промышленности при разработке рецептур белоксодержащих продуктов питания (мясные, кондитерские и т.д.). В данном исследовании с целью модификации функциональных свойств коммерческих белковых препаратов разработаны оптимальные/рациональные параметры биосинтеза новых гороховых, подсолнечных и пшеничных концентратов с ферментами тирозиназой и микробной трансглутаминазой, относящихся, соответственно, к классу оксидоредуктаз и трансфераз. При этом установлены закономерности влияния концентрации ферментов, продолжительности реакций и гидромодуля на массовую долю аминного азота и растворимого белка в среде как эффективных показателей контроля хода реакции в среде. У нового белкового концентрата, полученного из сухой пшеничной клейковины, синтезированного при последовательном внесении обоих видов ферментов, по сравнению с контрольным образцом, на 44% повысилась водосвязывающая способность и почти в 2 раза жиросвязывающая способность. У горохового и подсолнечного концентратов, приготовленных с раздельным внесением ферментов, на 24–56% стала выше водосвязывающая способность, в 2,3–2,4 раза — пенообразующая способность и в 1,6–5,7 раза более высокая стабильность пены. У подсолнечного концентрата увеличилась жиросвязывающая и жироземлюлирующая способность, по сравнению с исходным концентратом. Результаты влияния тирозиназы и микробной трансглутаминазы на функциональные свойства белковых концентратов, несмотря на различный принцип их действия, были, практически, одинаковые. Следовательно, для модификации свойств, взамен трансглутаминазы, с учетом выявленных параметров ее действия на гороховые, подсолнечные белки и пшеничную клейковину, для производства пищевых изделий целесообразно использовать и фермент тирозиназу.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены в рамках задания FGGM-2022-00006 ВНИИК — филиал ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А. Г. Лорха» «Разработать научно-практические основы технологии производства новых углеводных и белковых компонентов их крахмалосодержащего сырья на основе системного анализа их состава и свойств для глубокой переработки картофеля, зернового и зернобобового сырья».

Received 23.09.2025

Accepted in revised 27.02.2026

Accepted for publication 03.03.2026

© Kolpakova V. V., Gaivoronskaya I. S., Gulakova V. A., Semenov G. V., Tsurikova N. V., Sinitsyn A. P., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

ENZYMATIC SYNTHESIS OF PLANT PROTEIN CONCENTRATES AND THEIR FUNCTIONAL PROPERTIES

Valentina V. Kolpakova^{1*}, Irina S. Gaivoronskaya¹, Valentina A. Gulakova¹, Gennady V. Semenov², Nina V. Tsurikova³, Arkady P. Sinitsyn^{4,5}

¹All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre, Kraskovo, Moscow region, Russia

²Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, Russia

³Russian Research Institute of Food Biotechnology — branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia

⁴Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

KEYWORDS:

wheat gluten,
pea concentrate,
sunflower concentrate,
biosynthesis,
parameters,
optimization,
properties, modification

ABSTRACT

The functional properties of plant protein concentrates often do not meet the requirements imposed on them by food industry specialists when developing formulations of protein-containing foods (meat, confectionery, etc.). In this study, optimal/rational parameters of biosynthesis of new pea, sunflower and wheat concentrates, with tyrosinase and microbial transglutaminase enzymes, belonging, respectively, to the class of oxidoreductases and transferases, have been developed in order to modify the functional properties of commercial protein preparations. At the same time, patterns of the effect of enzyme concentration, reaction duration, and the hydromodule on the mass fraction of amino nitrogen and soluble protein in the medium as effective indicators for monitoring the course of the reaction in the medium have been established. Compared to the control sample,

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Колпакова, В.В., Гайворонская, И.С., Гулакова, В.А., Семенов, Г.В., Цурикова, Н.В., Сеницын, А.П. (2026). Ферментативный синтез растительных белковых концентратов и их функциональные свойства. *Пищевые системы*, 9(1), 44–53. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-44-53>

FOR CITATION: Kolpakova, V. V., Gaivoronskaya, I.S., Gulakova, V.A., Semenov, G.V., Tsurikova, N.V., Sinitsyn, A.P. (2026). Enzymatic synthesis of plant protein concentrates and their functional properties. *Food Systems*, 9(1), 44–53. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-44-53>

the new protein concentrate obtained from dry wheat gluten, synthesized with the sequential addition of both types of enzymes has a 44% higher water-binding capacity and almost 2 times higher fat-binding capacity. The pea and sunflower concentrates prepared with separate addition of enzymes have a 24–56% higher water-binding capacity, 2.3–2.4 times higher foaming capacity and 1.6–5.7 times higher foam stability. The sunflower concentrate has increased fat-binding and fat-emulsifying capacity compared to the original concentrate. The results of the effect of tyrosinase and microbial transglutaminase on the functional properties of protein concentrates, despite their different principle of action, were practically the same. Therefore, to modify the properties, it is advisable to use also the enzyme tyrosinase instead of transglutaminase for the production of food products, taking into account the identified parameters of transglutaminase action on pea, sunflower proteins and wheat gluten.

FUNDING: The investigations were carried out within the framework of the assignment FGGM-2022-00006 VNIIC — Branch of Russian Potato Research Centre “To develop scientific and practical foundations of the technology of production of new carbohydrate and protein components of their starch-containing raw materials based on the systematic analysis of their composition and properties for deep processing of potato, grain and leguminous raw materials”.

1. Введение

Одной из проблем населения земного шара является проблема обеспечения продовольствием, так как организму человека всегда необходимы питательные вещества [1]. Последние десятилетия характеризуются интенсификацией процессов приготовления пищи с одновременным приданием ей свойств, отражающих требования науки о питании [2]. Причинами такого положения являются рост населения, непостоянство запасов природных ресурсов и их использования, необходимость выпуска качественно новых и безопасных пищевых продуктов в связи с изменением образа жизни, ухудшением экологической обстановки и накоплением фундаментальных знаний в области естественных и технических наук. В качестве приоритетных процессов современные решения включают технологии получения пищевого белка и продуктов на его основе [3,4]. Технологии основываются на фундаментальных знаниях в области биологической, биоорганической, физической химии, и на знаниях в области технических дисциплин (биотехнология, технологии переработки зерна, мяса, молока и т.д.). Взаимосвязь познаний должна использоваться для того, чтобы обеспечить высокие функциональные свойства и через них достичь высокую биологическую ценность пищевых продуктов функциональной, диетической, персонализированной или специальной направленности.

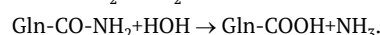
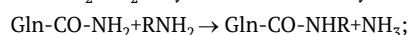
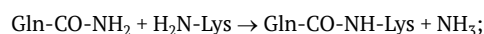
Белки в организме человека расходуются на синтез азотосодержащих соединений, рост и поддержку физиологических функций, а в пищевых продуктах они выполняют питательную и структурную функцию [5]. Первая функция заключается в обеспечении организма незаменимыми аминокислотами, как частично и энергией, вторая — в придании надлежащих потребительских качеств пищевым изделиям (внешний вид, текстура, объем, т.д.). Обе функции взаимосвязаны, питательная реализуется через структурную за счет функциональных свойств белков, которые и обеспечивают задаваемые технологические и потребительские свойства изделий [6].

В связи с возрастающей стоимостью животного сырья пищевая промышленность постоянно испытывает потребность в более дешёвых, но эффективных источниках белков [7]. Она находит их в ассортименте продуктов из сои [8], пшеницы [9–11], гороха, нута [12–15], чечевицы [16], фасоли [17], риса [18] и многих других культур [19,20]. При этом основными задачами промышленности является обеспечение выхода белков, их полифункциональности, безопасности, хороших органолептических свойств и длительности хранения [21]. Сегодня наиболее широко используемыми растительными ингредиентами в пищевых продуктах являются соевые белки и пшеничная клейковина [22,23]. Производство белковых продуктов из других видов растительного сырья продолжает развиваться. Из-за своей безопасности и традиций применения растительные продукты более привлекательные, чем те, которые начинают получать сегодня из насекомых (жуки, гусеницы, муравьи кузнечики и т.д.) или в виде «мяса», выращенного в лабораторных условиях из нового или нетрадиционного сырья [24].

Известны многие способы модификаций функциональных свойств соевых [25–27], клейковинных [28–30] и других видов белковых препаратов, и это, прежде всего, ферментативные способы с гидролитическими энзимами. При этом достигнуты значительные успехи, включая выявление у гидролизатов антиоксидантных или антиаллергических проявлений [31,32]. Однако способы, как правило, имеют ограничения относительно улучшения свойств, кроме растворимости и пенообразующей способности [18,28,30].

С целью расширения возможностей улучшения функциональных свойств нами изучены процессы синтеза новых белковых концентратов с ферментами о-дифенолоксидазой (тирозиной) (ЕС1.14.18.1) (ТИР) и микробной трансглутаминой (мТГ) (ЕС2.3.2.13). Последняя

широко используется за рубежом (США, страны ЕС, Канада, Китай, Корея и т.д.) [33,34] и производится путём ферментации *Streptomyces*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Providencia* [34]. На долю фермента приходится большая часть производимых в мире ферментных препаратов, это несмотря на то, что вопросы безопасности энзима продолжают обсуждаться [34,35]. Применяется фермент для обеспечения взаимодополнения состава и свойств белков либо из одного и того же сырья: мясного [36–39], молочного [40–43], рыбного [44], морепродуктов [45], зернового [46–48], псевдозлакового [49], либо из различного комбинированного, и, как правило, больше животного сырья (мясное, молочное, рыбное) [50,51]. При этом мТГ катализирует образование изопептидной связи между группой γ -карбоксамидов остатков глутамин (донор) и ϵ -аминными группами первого порядка, выступающих в качестве акцепторов ацильного остатка [34]. В отсутствие свободных аминогрупп фермент катализирует и реакцию дезамидирования амидов с использованием молекул воды в качестве акцептора групп $-NH_2$. Схематично реакции выглядят следующим образом:



Агрегированные белковые структуры — стабильные в широком диапазоне pH и температуры, механически устойчивые с повышенной эластичностью, твердостью, вязкостью, влагоудерживающей и эмульгирующей способностью [52,53]. Принцип «сшивания» белков в работах использовался непосредственно в технологический цикл производства пищевых изделий.

Аминокислота тирозин, являясь монофенолом, вступает в реакцию окисления под действием мет-, орто-гидрокситироиназ [54] с образованием хинонов, которые можно обнаружить только сканирующей спектроскопией [55]. В результате неферментативных реакций хиноны могут быстро конденсироваться с образованием комплексных соединений — меланинов [2,56] (Рисунок 1), затем превращаются по реакции Михаэля-1,6- присоединения с тиолами и циклизацией с аминогруппами в боковой цепи белков или регенерироваться за счет окислительно-восстановительной реакции в исходную аминокислоту/фенол. Тироиназа активирует полимеризацию пептидов, содержащих не только тирозин, но и цистеин [57]. Полученные полимеры адсорбируются на разных поверхностях [57] и также, как хиноны, изменяют структуру клеточных компонентов, и, прежде всего, белков [55]. Образование цистеин-допы в качестве биогенной связи в белках используется, например, при разработке способа получения имитаторов мидийной адгезии [58].



В фруктах и овощах часто ингибируют тироиназу, так как хиноны, образующиеся в результате окисления фенольных соединений,

придают им затемненный цвет и снижают доступность некоторых незаменимых аминокислот. Поэтому ведется поиск различных ингибиторов фермента [59], как и его стабилизаторов [60].

Целью данной работы явилась разработка параметров биосинтеза новых белковых концентратов (БК) с ферментами мТГ и ТИР и сравнительная оценка функциональных свойств полученных препаратов.

2. Объекты и методы

В качестве объектов использовали сухую пшеничную клейковину (СПК) (ООО «Cargill», Россия), подсолнечный концентрат (ПК) (ООО «Степь Инвест», Россия), гороховый концентрат (ГК) («Roquette», Франция) и ферментные препараты (ФП): микробную трансглутаминазу (мТГ) (КФ 2.3.2.13) («Novozymes», Дания) с активностью 200 ед./г и тирозиназу (ТИР) с активностью 54 ед./г (ООО Агрофермент, Россия). Исходные БК по показателям качества соответствовали Кодексу STAN 174–1989¹, ГОСТ 31934–2012² и ТР ТС 021/2011³ и ТР ТС 022/2011⁴. Функционально-технологические свойства (ФТС) БК (водосвязывающая способность — ВСС; жиросвязывающая способность — ЖСС; пенообразующая способность — ПОС; стабильность пены — СП; жироземлюлирующая способность — ЖЭС; стабильность эмульсии — СЭ; растворимость — Р) определяли по методикам, изложенным в работе [28]. Массовую долю белка — по методу Кьельдаля (ГОСТ 10846–91⁵), влаги — ГОСТ 13586.5–2015⁶, зольности — ГОСТ 10847–2019⁷, жира — ГОСТ 29033–91⁸, клетчатки — ГОСТ 31675–2012⁹, растворимого белка — по методу Лоури, аминного азота — методом формольного титрования с измерением реакции среды на рН-метре HI 2210 (HANNA, Германия). Реакцию биосинтеза БК осуществляли при различных значениях гидро модуля, концентрации ФП и температуры. Биосинтез БК с ферментами проводился по трем вариантам: один вариант включал раздельное применение ФП при оптимальных или рациональных параметрах синтеза, другой — совместное использование ФП в одну стадию (одностадийный способ) и третий — также совместное, но в две стадии: на первой стадии добавлялась ТИР, на второй стадии — мТГ (двухстадийный способ). При каждом внесении использовались оптимальные/рациональные параметры реакции биосинтеза белков при раздельном использовании.

¹ CODEX STAN 174–1989. Codex general standard for vegetable protein products (VPP). FAO, 1989.

² ГОСТ 31934–2012. «Глютен пшеничный. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2013. — 20 с.

³ Технический регламент Таможенного ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции». (Утвержден решением Совета Евразийской экономической комиссии 9 декабря 2011 г, № 880. Электронный ресурс <https://docs.cntd.ru/document/902320560>. Дата обращения 24.02.2025.

⁴ Технический регламент Таможенного ТР ТС 022/2011 «Пищевая продукция в части ее маркировки». (Утвержден решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 881 с Изменениями решением Совета ЕЭК на 14 сентября 2018 года № 75). Электронный ресурс <https://docs.cntd.ru/document/902320347> 24.02.2015.

⁵ ГОСТ 10846–91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка». М.: Стандартинформ, 2009. — 8 с

⁶ ГОСТ 13586.5–2015 «Зерно. Метод определения влажности». М.: Стандартинформ, 2019. — 24 с.

⁷ ГОСТ 10847–2019 «Зерно. Методы определения зольности». М.: Стандартинформ, 2019. — 25 с.

⁸ ГОСТ 29033–91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения жира». М.: Издательство стандартов, 2004. — 6 с.

⁹ ГОСТ 31675–2012 «Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации». М.: Стандартинформ, 2014. — 10 с.

Константу Михаэлиса (K_m) для ферментов мТГ и ТИР определяли по результатам графической зависимости скорости ферментативной реакции от концентрации субстрата и выражали как концентрацию, при которой белки вступают в реакцию в количестве 50% от максимального содержания. Белковые препараты высушивали сублимационным способом на стенде СВП-036 (НПО «Вакууммаш», Россия) до влажности 2–8% [61]. Все реактивы были химически чистые.

Для планирования эксперимента и обработки экспериментальных данных использовали математические методы. Оптимизацию параметров синтеза БК с ферментами осуществляли по плану эксперимента, составленным в виде латинских квадратов (матрица) для 25 опытов. Функцией являлось количество аминного азота в среде, факторами — продолжительность синтеза, гидро модуль, концентрация ферментов. Статистическая обработка результатов осуществлялась методами дисперсного и корреляционного анализов с программами Statistica 6.0, Mathematica 12.2 и TableCurve 3D. Результаты представлялись как средние арифметические со средними квадратичными ошибками среднего арифметического ($M \pm m$); доверительный интервал рассчитывался при уровне значимости $p = 0,05$.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Химический состав и функциональные свойства белковых концентратов

Исходные БК по показателям качества соответствовали нормативным документам, имели массовую долю белка, равную 74,48–84,00%, следовательно, относились к группе «Концентраты» (Таблица 1).

Анализ ФТС концентратов показал, что ВСС БК изменялась в диапазоне 2,22±7,48 г/г, ПОС — 97±211%, СП — 7±59%, ЖСС — 1,89±2,55 г/г, ЖЭС — 43±53%, СЭ — 49±62%, растворимость — 2,20±12.84% (Таблица 2).

Наибольшей ВСС обладал ГК, наименьшей — СПК. Наибольшие значения ПОС получены для СПК, наименьшие — для ПК. СПК имела и низкие значения ЖЭС и особенно растворимости, что, в принципе, и ограничивает ее применение в пищевых системах, кроме хлебопечения, например, в мясоперерабатывающей и кондитерской промышленности. Для двух других БК результаты указывали на необходимость модификации способности образовывать пену и ее стабильности, чтобы обеспечить эффективное использования свойств в производстве продуктов питания. Необходимо учитывать и то, что свойства и гороховых белков, и, особенно, подсолнечных, мало изучены и требуют более глубоких исследований.

Для ТИР на примере горохового БК первоначально исследовано ее совместное действие с аскорбиновой кислотой, которая могла бы исключить или уменьшить потемнение белков от образующихся меланинов. При действии ТИР в дозировках 1,6–5,7 ед/г и аскорбиновой кислоты при концентрации 0,05–0,1% количество свободной аминного азота составляло 294,7–297,7 мг/г, что равнялось его количеству в контрольном образце без ТИР (294,7±0,8 мг/г). С учетом этих данных и отсутствием потемнения БК с ТИР, использование ее в дальнейших опытах исключили.

3.2. Биосинтез клейковинного концентрата с мТГ

СПК является промышленно выпускаемым БК, недостатком которого, как указано выше, являются относительно низкие функциональные свойства. Это делает особо значимым модификацию СПК безопасными ферментативными способами. При проведении оптимизации параметров синтеза исследуемых белков функцией в процессе выступало количество аминного азота, при этом чем меньше оставалось его в реакции после воздействия ферментов, тем эффективнее протекала реакция. Зависимость содержания аминного азота

Таблица 1. Химический состав исходных белковых концентратов

Table 1. Chemical composition of initial protein concentrates

Белковый концентрат	Влага, %	Массовая доля, % на сухое вещество (СВ)			
		Белок, %	Жир, %	Клетчатка, %	Углеводы, %
Пшеничная клейковина (СПК)	7,55±0,87	74,48±0,23 (N×5,7)	1,80±0,05	1,95±0,04	21,77±0,88
Гороховый (ГК)	7,16±1,03	84,00±0,07 (N×6,25)	5,00±0,65	1,00±0,05	10,00±1,24
Подсолнечный (ПК)	2,79±0,86	81,2±0,11 (N×6,25)	0,71±0,35	1,73±0,02	16,55±1,03

Таблица 2. Функциональные свойства белковых концентратов

Table 2. Functional properties of protein concentrates

Концентрат	ВСС, г/г	ПОС, %	СП, %	ЖСС, г/г	ЖЭС, %	СЭ, %	Р, %
СПК	2,22±0,03	211±1	59±2	1,97±0	43±2	49±1	2,20±1,25
ГК	7,48±0,51	109±2	65±5	2,55±0,05	50±1	62±6	12,84±1,20
ПК	3,72±0,56	97±2	7±1	1,89±0,12	53±1	60±1	10,86±1,03

от искомым факторов (концентрация фермента, продолжительность, гидромодуль) для СПК искали в виде уравнения с помощью программы Математика 12.2:

$$mA = a_0 \times fce \times ft \times fh, \tag{1}$$

где: ce — концентрация фермента, ед./г; t — продолжительность, часы; h — гидромодуль.

Для нахождения неизвестного коэффициента использовали программу Mathematica 12.2. Через листинг решения уравнения определили коэффициент a_0 , три других коэффициента для исследуемых факторов и оптимальные значения последних для измерения количества аминного азота в ходе реакции. Уравнение зависимости количества аминного азота Y от исследуемых факторов (2) имело следующий вид:

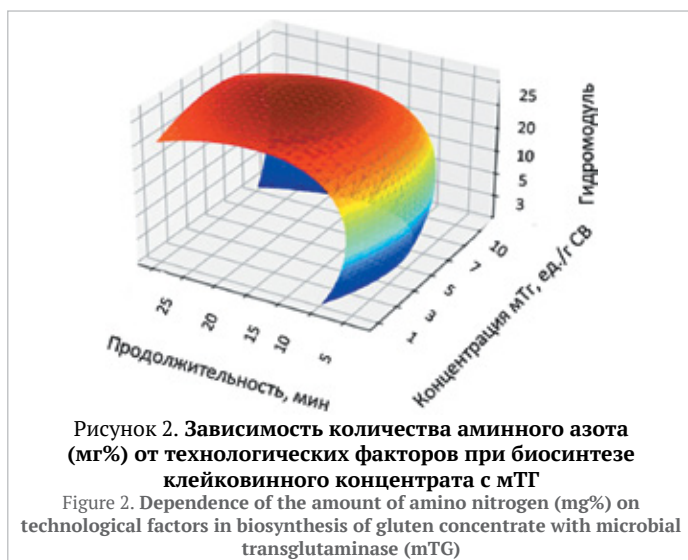
$$Y = 19,478 + 0,5268X_1 - 0,0252X_2 - 0,04203X_3, \tag{2}$$

где: Y — количество аминного азота, мг/%; X_1 — концентрация мТГ (ед/г); X_2 — продолжительность процесса (минуты); X_3 — гидромодуль.

Увеличение X_1 на 1 ед. измерения в среднем повышало Y на 0,527 ед., а увеличение X_2 и X_3 на 1 ед. уменьшало Y на 0,0252 и 0,042 ед., соответственно. Из максимального коэффициента $\beta_1 = 0,5268$ видно, что наибольшее влияние на Y оказывал фактор X_1 . Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Значения парных коэффициентов уравнения показали низкую взаимосвязь между X_3 и X_2 . Наибольшее влияние на результат оказывал фактор X_1 ($r = 0,2352$), поэтому в уравнение он был включен первым. Поверхности отклика количества аминного азота, построенные в виде 3D с помощью программы TableCurve 3D (Рисунок 2), отразили зависимость функции от исследуемых факторов. Из решения уравнения оптимальные их значения, обеспечивающие минимальное количество аминного азота ($Y = 97,37$ мг/%) в среде, были следующие: концентрация мТГ-8 ед./г, продолжительность процесса-15,4 минут, гидромодуль — 1:8,05.

3.3. Биосинтез клейковинных концентратов с ТИР

Параметры биосинтеза СПК с ТИР определяли по результатам влияния исследуемых факторов на количество аминного азота и растворимого белка. Показано, что при гидромодуле 1:5 и температуре

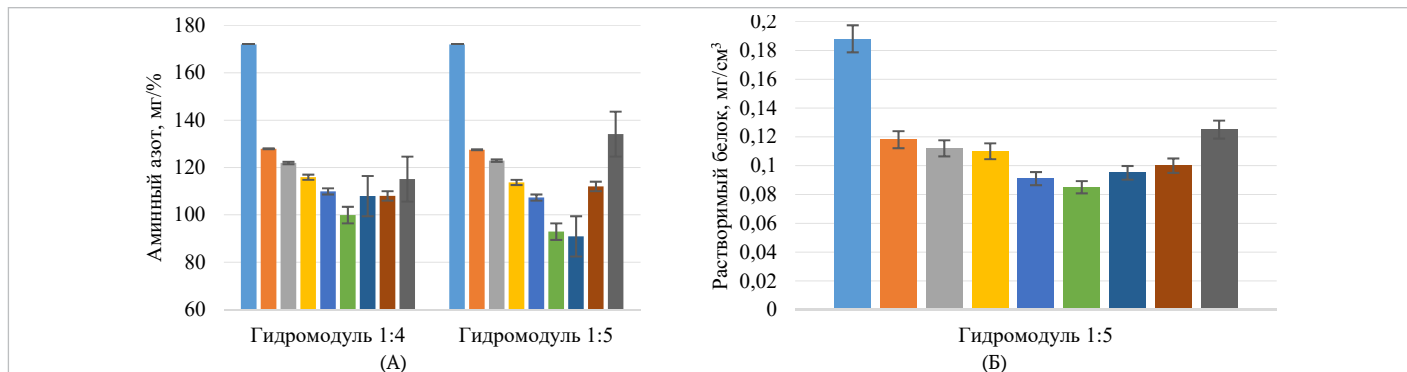


53±2 °С наименьшее количество свободного аминного азота (54–57%) после реакции с ТИР оставалось при концентрации фермента 5,40 и 10,80 ед./г СВ (Таблица 3). При данных значениях концентрации ТИР в БК содержалось и меньшее количество растворимого белка, что указывало на большую степень агрегации и «сшивки» белков под влиянием энзима.

Исследование зависимости количества аминного азота от величины гидромодуля (1:4÷1:5) при различной концентрации ТИР показало, что при гидромодуле 1:5 после реакции его оставалось на 19–25% меньше, чем при 1:4 (Рисунок 3А). При гидромодуле 1:5 и концентрации ТИР 5,4 ед./г СВ больше всего уменьшилось и количество растворимого белка (Рисунок 3Б). В итоге, за рациональные параметры синтеза БК с ТИР приняты следующие параметры: концентрация ФП — 5,4–10,8 ед./г СВ, гидромодуль — 1:5, продолжительность реакции — 15–20 мин. Параметры биосинтеза БК из СПК

Таблица 3. Влияние концентрации ТИР на количество аминного азота в СПК
Table 3. Effect of tyrosinase (TYR) concentration on the amount of amino nitrogen in dry wheat gluten

Контроль СПК (без фермента)	Концентрация ТИР, ед./г СВ							
	0,160	0,216	0,270	0,378	0,540	0,810	5,40	10,8
172,0±2	124,3±0,9	119,9 ±4,3	104,9±1,5	109,4±8,1	104,9±5,1	102,9±8,0	93,1±2,3	98,8±2,1
Аминный азот, мг/% (55±2 °С)								
100	72	70	61	63	66	68	54	57
Растворимый белок, мг/см ³								
0,175	0,092	0,095	0,102	0,125	0,120	0,120	0,067	0,072
Растворимый белок, по сравнению с контролем, %								
100	52	54	60	70	68	68	38	41
Аминный азот, мг/% (24±1 °С)								
99,9±1,2	99,9±0,6	101,9±2,1	99,9±0,7	97,9±1,0	109,9±0,7	100,1±1,0	125,9±0,3	147,8±0,2
Аминный азот, по сравнению с контролем, %								
100	100	100	100	88	10	1	26	85



сведены в Таблицу 4. В Таблице 4 приведены и параметры биосинтеза БК из СПК при совместном использовании ферментов мТГ и ТИР. Видно, что наименьшее количество аминного азота в среде оставалось при одностадийном способе использования ферментов (58%), по сравнению с одной ТИР или двухстадийном введении обоих ферментов, количество азота при этом уменьшалось на 67–68%.

Таблица 4. Параметры синтеза клейковинного концентрата
Table 4. Parameters of gluten concentrate synthesis

Концентраты	Концентрация ФП, ед./г СВ	Продолжительность, мин	Гидро-модуль	Аминный азот, мг%
Контроль (СПК)	0	15	1:5,0	143,7±1,20
С ферментами:				
ТИР	5,4	15–20	1:5÷1:5	98,5±5,6
мТГ	8,0	15,4	1:8,05	121,5±0,41
Двухстадийный способ				
ТИР+мТГ	5,4+8,0	15+15	1:5+1:8	95,9±0,60
Одностадийный способ				
ТИР+мТГ	5,4+8,0	15–20	1:7,0	83,9±0,04

3.4. Функциональные свойства клейковинных БК, полученных с мТГ и ТИР

Концентраты, синтезированные с мТГ и ТИР, имели преимущества, по сравнению с контрольной СПК, только по значению ЖСС. Способность связывать жир увеличивалась на 29–43% (Таблица 5).

Таблица 5. Функциональные свойства клейковинных концентратов
Table 5. Functional properties of gluten concentrates

Образец	ВСС, г/г	ПОС, %	СП, %	ЖСС, г/г	ЖЭС, %	СЭ, %	Р, %
Контроль СПК	2,33± 0,03	197±1	75±2	2,18±0,01	50±0	45±1	33,7±1,1
Композит с ферментами:							
ТИР	2,16± 0,03	199±2	66±2	2,54±0,01	45±1	40±1	5,40±1,2
мТГ	2,17± 0,03	200±0	63±1	2,83±0,01	48±0	45±1	4,31±0,8
Двухстадийный способ							
ТИР+мТГ	3,46± 0,23	204±2	70±2	4,27±0,10	50±0	60±0	28,4±1,1
Одностадийный способ							
ТИР+мТГ	2,36± 0,13	197±0	77±0	2,13±0,01	55±0	60±0	25,7±0,8

Более положительное влияние на свойства БК из СПК оказывал двухстадийный способ использования ферментов, при котором, по сравнению с контрольной СПК, у концентрата на 48% повышалась ВСС и почти в 2 раза — ЖСС, но незначительно уменьшилась растворимость. При совместном одностадийном использовании ТИР и мТГ эффективность действия ферментов была ниже. Следовательно, синтез клейковинного БК, и, прежде всего, для увеличения ВСС можно рекомендовать при двухстадийном способе применения энзимов.

3.5. Биосинтез гороховых концентратов с ТИР

Изучение влияния параметров синтеза горохового БК с ТИР на количество аминного азота показало, что при выбранных дозировках фермента 0,72 ед./г и 0,90 ед./г СВ наиболее эффективным, с точки зрения наименьшего его значения, гидромодуль равнялся 1:1,50÷1:1,67 (Рисунок 4). При обеих дозировках ФП и гидромодуле 1:1,67 время реакции составило 30–35 минут (Рисунок 5), а количество аминного азота в среде уменьшилось на 60–70%, по сравнению с контрольной СПК.

Исследование влияния различной концентрации ТИР при гидромодуле 1:1,67 и продолжительности реакции 30–35 мин на количество аминного азота показало, что непрореагировавшего азота меньше всего оставалось при дозировках 0,90–1,26 ед./г СВ (Рисунок 6А), а растворимого белка — при дозировках 0,54 ед./г и 0,81 ед./г (Рисунок 6Б).

Отсюда в качестве рациональных параметров для синтеза горохового БК отобраны: время реакции — 30–35 минут; гидромодуль 1:1,50÷1,67; концентрация ТИР — 0,81±0,90 ед./г СВ.

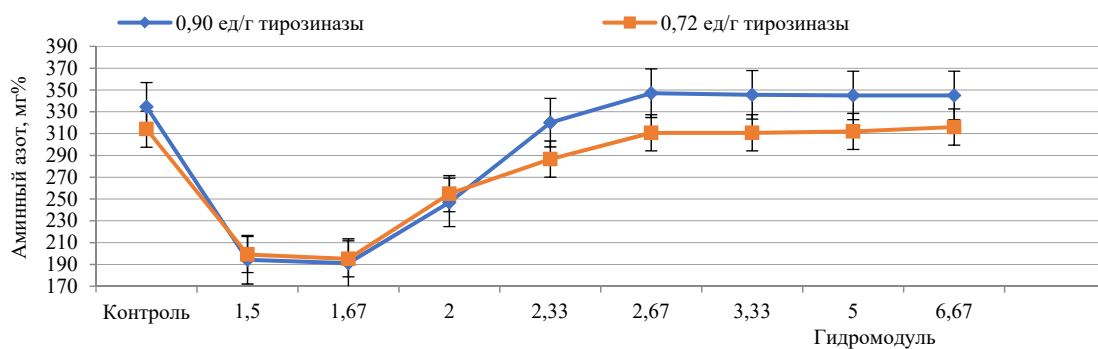


Рисунок 4. Влияние гидромодуля на количество аминного азота в ГК, мг/%
Figure 4. Effect of the hydromodule on the amount of amino nitrogen in the pea concentrate (PC), mg/%

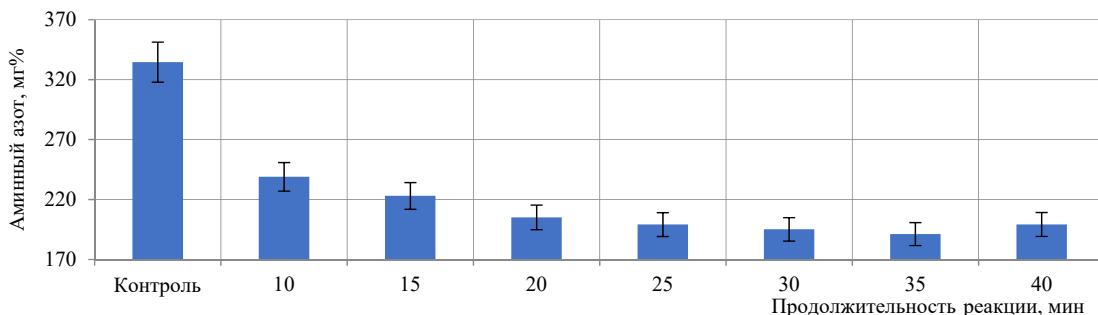
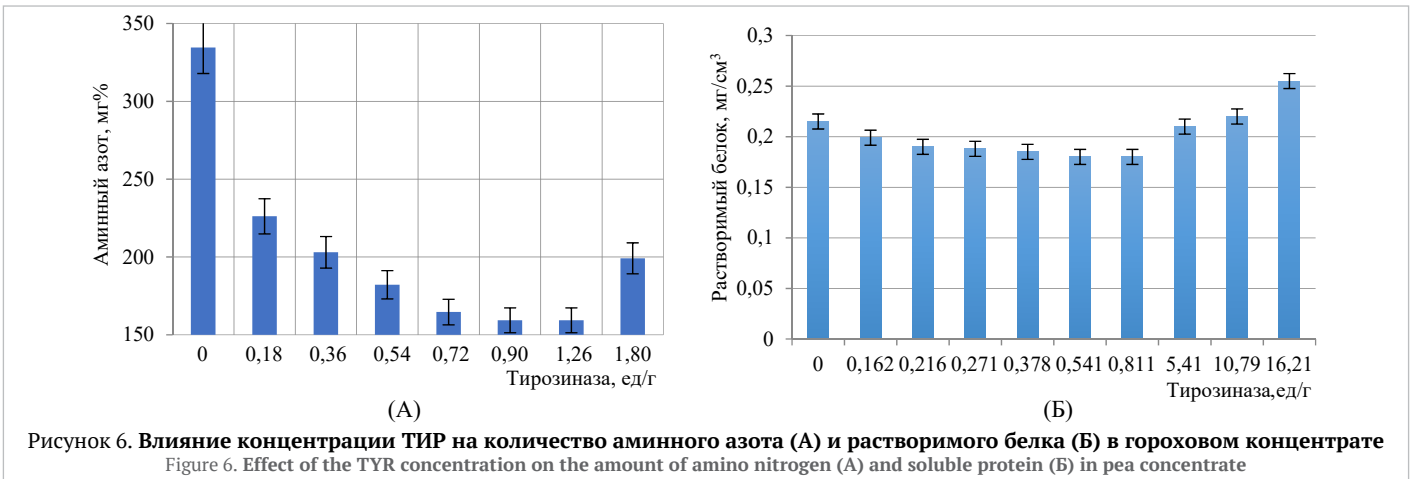


Рисунок 5. Влияние продолжительности синтеза БК на количество аминного азота в ГК
Figure 5. Effect of duration of protein concentrate synthesis on the amount of amino nitrogen in PC



3.6. Биосинтез горохового концентрата с мТГ (далее выделите разделы по аналогии)

Параметры синтеза горохового БК с мТГ определяли, ориентируясь на константу Михаэлиса, измеренную для фермента ТИР. Используя результаты зависимости белка, перешедшего в раствор, от навески БК (Рисунок 7), рассчитали ее значение и установили, что оно, практически, одинаковое для обоих ферментов и равнялось 33,6036,4 мг белка/мин. При том же гидромодуле 1:1,67 и концентрации мТГ 0,81–0,90 ед./г СВ продолжительность реакции равнялась 30–35 минут (Рисунок 8).

Количество аминного азота в БК в процессе синтеза, по сравнению с контрольным вариантом, уменьшалось на 66%. Совместное же использование ферментов не приводило к достоверному снижению количества аминного азота, по сравнению с отдельным их использованием (Таблица 6).

3.7. Функциональные свойства гороховых концентратов с мТГ и ТИР

По сравнению с контрольным образцом, у концентратов с мТГ и ТИР на 24–34% повысилась ВСС, в 2,3–2,4 раза — ПОС, в 1,6–1,8 раза — СП, незначительно понизились растворимость и ЖЭС (Таблица 7). Однако значения этих двух параметров оставались на уровне, аналогичном свойствам БК и композитов, полученных из других видов зернового сырья: пшеницы [11,30,62], риса [18], ржи, ячменя [63] тритикале [64]. Таким образом, оба фермента целесообразно использовать для улучшения водосвязывающей способности и пенообразующих свойств горохового БК для использования в производстве мясных, хлебобулочных, кондитерских изделий, включая те, в основе которых лежат пенные системы (зефир, пастила и др.) и содержатся жиры.

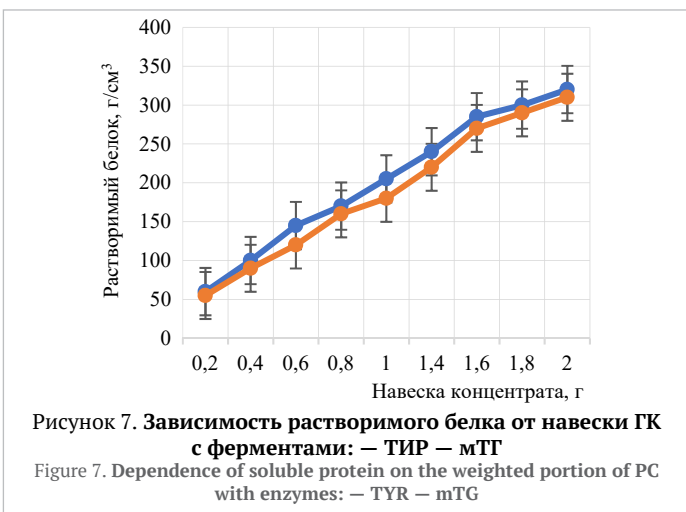


Таблица 7. Функциональные свойства гороховых концентратов
 Table 7. Functional properties of pea concentrates

Концентраты	ВСС, г/г	ПОС, %	СП, %	ЖСС, г/г	ЖЭС, %	СЭ, %	Р, %
Контроль (ГК)	3,16±0,19	47±0	18±1	1,87±0,06	74±1	97±1	22,2±0,3
Концентраты с ферментами							
ТИР	4,19±0,11	114±1	33±1	1,98±0,07	52±1	50±1	15,0±0,3
мТГ	4,24±0,10	110±1	29±1	1,80±0,05	53±1	47±1	16,1±0,2

Таблица 6. Количество аминного азота при различных параметрах синтеза горохового БК

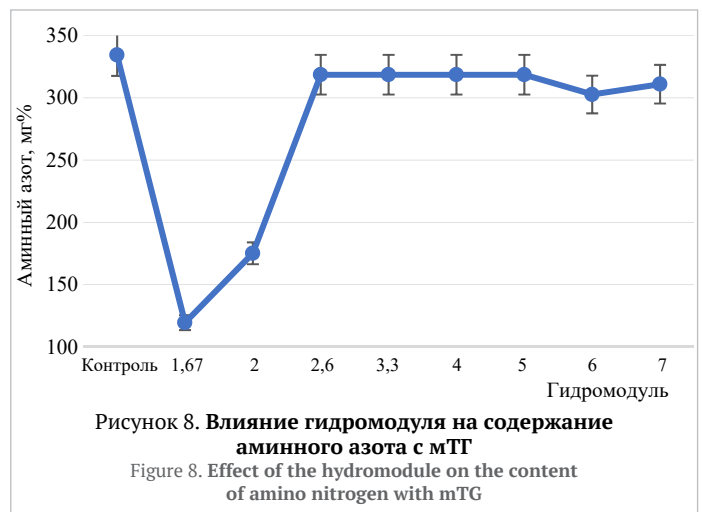
Table 6. Amount of amino nitrogen upon different parameters of synthesis of pea protein concentrate

Концентраты	Концентрация ФП, ед./г СВ	Продолжительность, мин	Гидро-модуль	Аминный азот, мг%
Контроль	0	30–35	1:1,67	147,4±1,20
Концентраты с ферментами				
ТИР	0,90	30–35	1:1,67	92,1±0,60
ТИР	5,40	30–35	1:1,67	140,4±0,20
мТГ	0,90	30–35	1:1,67	88,4±0,41
мТГ	0,90	30–35	1:7,00	140,0±0,65
мТГ	5,40	30–35	1:7,00	136,7±0,25
ТИР+мТГ (две стадии)	0,90+0,90	30+30	1:1,67	150,3±1,60
ТИР+мТГ (одна стадия)	0,90+0,90	30–35	1:1,67	89,8±0,04

3.8. Биосинтез подсолнечных белковых концентратов с ТИР и мТГ

Уравнения зависимости количества аминного азота Y от исследуемых факторов для подсолнечных БК, полученных при оптимизации отдельного использования ТИР (3) и мТГ (4), имели, соответственно, следующий вид:

$$Y = 0,5908 + 50,4X_1 + 0,0336X_2 + 0,01736X_3, \quad (3)$$



$$Y = 1,834 + (b_1) 168 X_1 - (b_2) 0,0028 X_2 - (b_3) 0,14 X_3, \quad (4)$$

где: Y – количество аминокислотного азота; X₁ – концентрация ФП; X₂ – продолжительность процесса; X₃ – гидромодуль.

Поверхности отклика количества аминокислотного азота от исследуемых параметров, построенные с программой TableCurve 3D (Рисунок 9), указывали на их взаимосвязь. Коэффициенты корреляции уравнений R(1)=0,5908 и R(2)=0,7875 свидетельствовали об адекватном описании экспериментальных данных, а значения парных коэффициентов X₂ и X₃, как и для клейковинного белка – о низкой взаимосвязи между продолжительностью синтеза и гидромодулем. Оптимальные значения параметров, соответствующие наименьшему количеству аминокислотного азота в среде, были следующие: для ТИР при Y=1,28 мг/% – концентрация фермента 0,189 ед./г СВ, продолжительность реакции 15,74 мин, гидромодуль 1:5,06, для мТГ при Y=52,94 мг/% – концентрация 0,30 ед./г, продолжительность 14,14 мин, гидромодуль 1:4,8. В подсолнечном БК, полученном при оптимальных параметрах с ТИР, по сравнению с исходным ПК, количество азота уменьшалось почти в 80 раз, а в концентрате с мТГ – в 2 раза.

При двух- и одностадийном способах совместного использования ТИР и мТГ наименьшее количество аминокислотного азота в конце реакции выявлено при концентрации ТИР 0,216–0,270 ед./г СВ (варианты 5, 6), концентрации мТГ – 0,3–0,8 ед./г СВ (варианты 4,5) и гидромодуле 1:5 (Таблица 8). Количество азота при двухстадийном введении фермента, по сравнению с контрольным БК, при данных параметрах уменьшилось почти в 60 раз, при одностадийном – в 48 раз. Итоговые параметры синтеза подсолнечных БК представлены в Таблице 9.

3.9. Функциональные свойства подсолнечных концентратов с мТГ и ТИР

Анализ функциональных свойств БК, полученных по оптимальным параметрам с ТИР и мТГ, показал, что ВСС образцов повысилась на 47–56%, по сравнению с контрольным образцом, стабильность пены – в 5,7 раза, ЖЭС – на 11%, ЖСС – на 25% (Таблица 10). Значения ВСС и ЖСС несколько лучше были у БК, полученном с ТИР.

Свойства БК, синтезированных при совместном использовании ферментов, не улучшились, по сравнению с отдельным их применением, следовательно, биосинтез БК целесообразен с каждым ферментом в отдельности.

Таблица 8. Аминокислотный азот в подсолнечном БК при различных способах внесения ферментов

Table 8. Amino nitrogen in sunflower protein concentrate upon different ways of enzyme addition

№ п/п	Концентрация, ед./г СВ		Продолжительность, мин		Аминокислотный азот, мг %	Продолжительность, мин	Аминокислотный азот, мг %
	ТИР	мТГ	Двухстадийный способ				
			ТИР	мТГ	ТИР + мТГ		
1	Контроль, без ферментов		0	0	40,95±1,30	0	40,95±1,30
2	0,054	0,20	5	5	5,25±0,31	5	2,10±0,31
3	0,108	0,40	10	10	1,82±0,02	10	1,26±0,22
4	0,189	0,30	15,74	14,14	0,84±0,04	15	1,12±0,00
5	0,216	0,80	25	25	0,70±0,02	25	0,98±0,00
6	0,270	1,00	30	30	0,70±0,07	30	1,26±0,31
7	0,350	0,30	14	15	37,80±1,05	15	34,65±0,40

Таблица 9. Параметры синтеза подсолнечного БК при различных способах введения мТГ и ТИР

Table 9. Synthesis parameters of sunflower protein concentrate upon different ways of mTG and TYR addition

Белковые препараты	Концентрация ФП, ед./г СВ	Продолжительность, мин	Гидромодуль	Аминокислотный азот, мг %
ПК (без ферментов)	0	15	1:5,0	106,1±1,20
Концентраты с ферментами				
ТИР	0,216	15,74	1:5,00	1,30±0,25
мТГ	0,300	14,14	1:4,80	54,30±0,91
Концентраты с двумя ферментами				
ПК (без ферментов)	0	50	1:6,0	40,95±1,30
ТИР+мТГ (две стадии)	0,216+0,80	25+25	1:6,0	0,70±0,00
ТИР+мТГ (одна стадия)	0,216+0,80	25	1:6,0	0,98±0,04

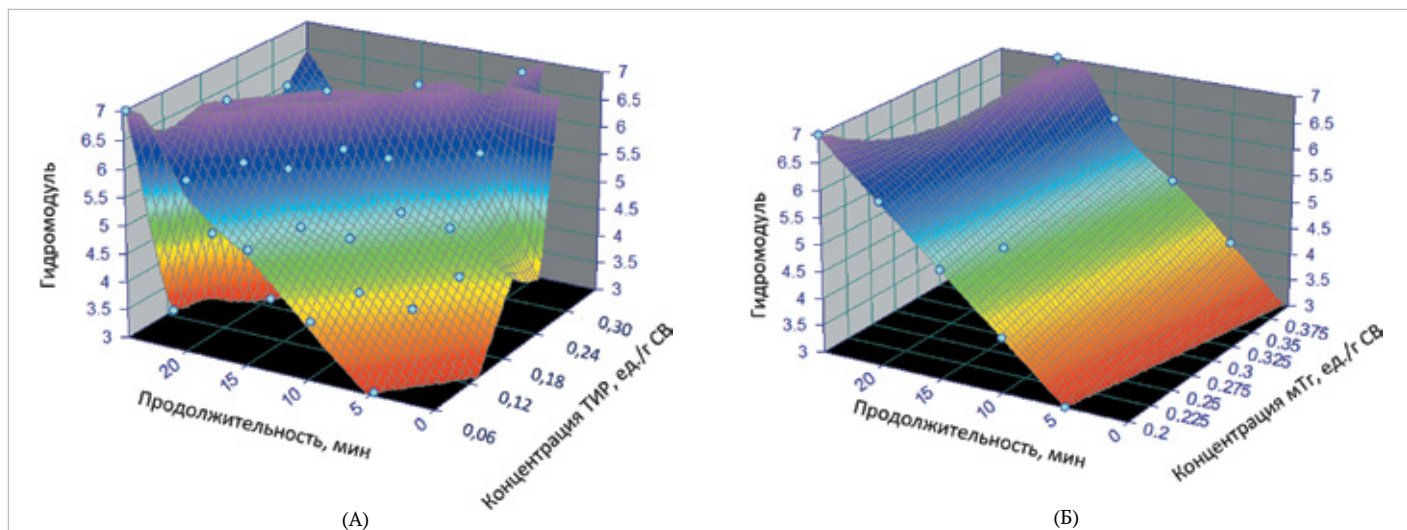


Рисунок 9. Зависимость количества аминокислотного азота (мг %) от параметров синтеза: (А) – ТИР, (Б) – мТГ
Figure 9. Dependence of the amount of amino nitrogen (mg %) on synthesis parameters: (A) – TYR, (B) – mTG

Таблица 10. Функциональные свойства подсолнечных концентратов

Table 10. Functional properties of sunflower concentrates

Образец	ВСС, г/г	ПОС, %	СП, %	ЖСС, г/г	ЖЭС, %	СЭ, %	Р, %
Контроль ПК	3,72±0,12	140±2	7±1	1,90±0,12	53±2	64±1	10,9±0,72
Концентраты с ферментом:							
ТИР	5,80±0,32	145±2	40±2	2,97±0,32	63±2	68±1	2,25±0,42
мТГ	5,47±0,22	145±1	40±1	2,37±0,12	62±1	68±0	2,25±0,17
Двухстадийный способ с двумя ферментами							
ТИР+мТГ (две стадии)	3,47±0,11	138±3	7±1	2,63±0,12	48±2	28±1	3,34±0,54
Одностадийный способ с двумя ферментами							
ТИР+мТГ	3,30±0,11	138±2	6±0	2,71±0,12	53±2	50±1	3,45±0,24

Известно, что ферменты мТГ и ТИР используются в качестве сшивающих агентов белков с целью модификации свойств и структуры пищевых систем благодаря способности образовывать в них поперечные связи. При этом в отношении мТГ получены значительные результаты [65]. Применение последней наиболее изучено для мясных систем, включая, например, аналоги куриной колбасы [66], культивируемое мясо [67], стейки из кусочков мяса с изолятами горохового, рисового белка и чечевичной мукой [68], как и для молочных белков и их фракций [69,70]. Работы по использованию ферментов для улучшения ФТС белковых концентратов/изолятов значительно меньше и, особенно, это относится к ТИР.

Если сравнить полученные данные, например, с результатами для овсяного белка и белка из конских бобов [71], то они согласуются в отношении уменьшения их растворимости под действием ферментов, и различий в концентрациях мТГ, «схватывающих» белки из зерновых или бобовых культур: для СПК концентрация была выше, чем для горохового БК (8 ед./г и 0,9 ед./г, соответственно), также как и 100/1000 ед./г для овсяного, против 10 ед./г для белков из конских бобов [71]. С другой стороны, мТГ улучшала ПОС овсяного белка, а по нашим данным, и ТИР повышала ее значения, как у СПК, так и у ГК. Результаты по снижению растворимости БК согласовывались с результатами других авторов, например, для белков гороха, риса [72,73] и фасоли [74]. ЖЭС изменялась в зависимости от природы белков: у гороховых — ухудшались, а у подсолнечных оставались без изменений, по сравнению с нативными белками. По другим данным известно, что стабильность эмульсий у белков нута под влиянием мТГ только после месяца хранения была выше, по сравнению с нативными белками [75]. Известно и то, что изолированный соевый белок показывал ниже эмульгирующую способность под влиянием мТГ, чем исходный белок, это при снижении только 3% аминного азота за 1–2 часа реакции при удовлетворительной стабильности эмульсии [76]. По нашим данным, ЖЭС и стабильность эмульсий у СПК и ПК не ухудшались, так как параметры синтеза определены при меньшем количестве остаточного аминного азота в среде: для СПК оно понижалось на 43–46%, для ПК — на 49–98%, по сравнению с контролем.

Так как целью данной работы было сравнение ФТС концентратов, «сшитых» с мТГ и с недостаточно изученной ТИР с другим механизмом действия, то установлено, что для СПК различий в свойствах, синтезированных БК не обнаружено. Показано положительное влияние совместного двухстадийного способа использования ферментов для

улучшения ВСС и ЖСС. Для гороховых и подсолнечных БК, по аналогии с СПК, различий в ФТС белков под влиянием ТИР и мТГ не выявлено; ВСС, ПОС, стабильность пены, ЖСС и ЖЭС улучшались при раздельном их применении. Совместное использование ферментов не имело преимуществ, по сравнению с раздельным, для обоих БК.

4. Заключение

Разработаны биотехнологические основы синтеза БК из сухой пшеничной клейковины, горохового и подсолнечного концентратов для модификации их функциональных свойств:

- установлены закономерности влияния параметров на массовую долю аминного азота и растворимого белка: при повышении гидромодуля, продолжительности реакции и концентрации мТГ и ТИР показатели уменьшались, затем оставались постоянными и вновь возрастали. Возможно, это было связано с ингибированием активного центра ферментов продуктами реакции или субстратами;
- определены оптимальные/рациональные параметры синтеза БК и способы внесения в ФП: для клейковинного БК — двухстадийный способ с концентрацией ТИР 5,4 ед./г и мТГ 8,0 ед./г, продолжительностью реакции — по 15 минут, гидромодулем 1:5 и 1:8, соответственно. Для горохового и подсолнечного БК эффективно раздельное использование мТГ/ТИР с концентрацией 0,81–0,90 ед./г СВ, продолжительностью 30–35 минут и гидромодулем 1:1,50÷1,67. Параметры для подсолнечного БК: концентрация ТИР — 0,189 ед./г СВ, время реакции 15,74 мин, гидромодуль 1:5,06, для БК с мТГ — 0,30 ед./г, 14,14 мин и гидромодуль 1:4,8, соответственно.
- функциональные свойства клейковинного БК, полученного при совместном использовании ТИР и мТГ, а горохового и подсолнечного при раздельном применении были улучшены. По сравнению с контрольной СПК, у «сшитого» БК на 44% повышалась ВСС и почти в 2 раза — ЖСС, у горохового БК на 24–34% улучшилась ВСС, в 2,3–2,4 раза — ПОС и в 1,6–1,8 раза — СП, у подсолнечного БК на 47–56% повысилась ВСС, стабильность пены — в 5,7 раза, ЖЭС и ЖСС на 11–25%, по сравнению с исходными БК.
- результаты влияния ТИР и мТГ на функциональные свойства БК, не смотря на различный принцип действия ферментов, практически, одинаковые, следовательно, для модификации свойств БК возможна взаимозаменяемость ферментов с учетом параметров их действия на клейковинные, гороховые и подсолнечные белки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Goncharova, N., Merzlyakova, N. (2021). Food shortages and hunger as a global problem. *Food Science and Technology*, 42(2), Article 70621. <https://doi.org/10.1590/Fst.70621>
2. Нечаев, А. П., Кочеткова, А. А., Колпакова, В. В., Траубенберг, С. Е., Витол, И. С., Кобелева, И. Б. и др. (2024). Пищевая химия. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2024. [Nechaev, A. P., Kochetkova, A. A., Kolpakova, V. V., Traubenberg, S. E., Vitol, I. S., Kobleleva, I. B. et al. (2024). Food chemistry. St. Petersburg: GIORД, 2024. (In Russian)]
3. Williams, R. A. (2021). Opportunities and challenges for the introduction of new food proteins. *Annual Review of Food Science and Technology*, 12, 75–91. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-061220-012838>
4. Kołodziejczak, K., Onopiuk, A., Szpicer, A., Póltorak, A. (2021). Meat analogues in the perspective of recent scientific research: A review. *Foods*, 11(1), Article 105. <https://doi.org/10.3390/foods11010105>
5. Heertje, I. (2014). Structure and function of food products: A review. *Food Structure*, 1(1), 3–23. <https://doi.org/10.1016/j.foosr.2013.06.001>
6. Колпакова, В. В., Бызов, В. А. (2024). Функциональные характеристики и молекулярно-структурная модификация растительных белков. Обзор. *Пищевые системы*, 7(3), 324–335. [Kolpakova, V. V., Byzov, V. A. (2024). Functional characteristics and molecular structural modification of plant proteins. Review. *Food Systems*, 7(3), 324–335. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335>
7. WHO/FAO. (2018). Driving commitment for nutrition within the UN Decade of Action on Nutrition: Policy brief. World Health Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018.
8. Лисицын, А. Б., Захаров, А. Н., Исаков, М. Х., Алиев, М. С. (2014). Современное состояние российского рынка сои и соевых белков. *Все о мясе*, 4, 20–23. [Lisitsyn, A. B., Zakharov, A. N., Isakov, M. Kh., Aliev, M. S. (2014). Current state of the Russian market of soy and soy proteins. *Vsyo o Myase*, 4, 20–23. (In Russian)]
9. Нечаев, А.П., Дубцова, Г.Н., Колпакова, В.В. (1995). Белки пшеницы. Технология получения и применения (состояние, проблемы, пути развития). *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 1–2(224–225), 28–30. [Nechaev, A. P., Dubtsova, G. N., Kolpakova, V. V. (1995). Wheat proteins. Production technology and application (state, problems, ways of development). *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 1–2(224–225), 28–30. (In Russian)]
10. Day, L. (2011). Wheat gluten: Production, properties and application. Chapter in a book: *Handbook of Food Proteins*. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. <http://doi.org/10.1533/9780857093639.267>
11. Kolpakova, V. V., Lukin, N. D., Gaivoronskaya, I. S. (2018). Interrelation of functional properties of protein products from wheat with the composition and physicochemical characteristics of their proteins. Chapter in a book: *Global Wheat Production*. London: IntechOpen, 2018. <http://doi.org/10.5772/intechopen.75803>
12. Колпакова, В. В., Куликов, Д. С., Уланова, Р. В., Чумикина, Л. В. (2021). Пищевые и кормовые белковые препараты из гороха и нута: производство, свойства, применение. *Техника и технология пищевых производств*, 51(2), 333–348. [Kolpakova, V. V., Kulikov, D. S., Ulanova, R. V., Chumikina, L. V. (2021). Food and feed protein preparations from peas and chickpeas: Production, properties, application. *Food Processing: Techniques and Technology*, 51(2), 333–348. (In Russian)] <http://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-333-348>
13. Gao, Z., Shen, P., Lan, Y., Cui, L., Ohm, J.-B., Chen, B., Rao, J. (2020). Effect of alkaline extraction pH on structure properties, solubility, and beany flavor of yellow pea protein isolate. *Food Research International*, 131(4), Article 09045. <http://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109045>
14. Shen, Y., Hong, S., Li, Y. (2022). Pea protein composition, functionality, modification, and food applications: A review. *Advances in Food and Nutrition Research*, 101, 71–127. <http://doi.org/10.1016/bs.afnr.2022.02.002>
15. Patil, N. (2023). Chickpea protein: A comprehensive review on nutritional properties, processing, functionality, applications, and sustainable impact. *The Pharma Innovation Journal*, 12(7), 3424–3434.
16. Funke, M., Loeffler, M., Winkelmeier, C., Krayner, M., Boom, R., Weiss, J. (2022). Emulsifying properties of lentil protein preparations obtained by dry fractionation. *European Food Research and Technology*, 248, 381–391. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03883-y>
17. Vogelsang-O'Dwyer, M., Petersen, I. L., Joehne, M.S., Sorensen, J. C., Bez, J., Detzel, A. et al. (2020). Comparison of faba bean protein ingredients produced using dry fractionation and isoelectric precipitation: Techno-functional, nutritional and environmental performance. *Foods*, 9(3), Article 322. <https://doi.org/10.3390/foods9030322>
18. Колпакова, В. В., Фан, Ч. К., Гайворонская, И. С., Чумикина, Л. В. (2023). Свойства и структурные особенности белков нативных и модифицированных концентратов из белого и коричневого риса. *Пищевые системы*, 6(3), 317–328. [Kolpakova, V. V., Fan, C. K., Gaivoronskaya, I. S., Chumikina, L. V. (2023). Properties and structural features of proteins of native and modified concentrates from white and brown rice. *Food systems*, 6(3), 317–328. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-3-317-328>
19. Östbring, K., Malmqvist, E., Nilsson, K., Rosenlind, I., Rayner, M. (2020). The effects of oil extraction methods on recovery yield and emulsifying properties of

- proteins from rapeseed meal and press cake. *Foods*, 9(1), Article 19. <https://doi.org/10.3390/foods9010019>
20. Dabbour, M., He, R., Ma, H., Musa, A. (2018). Optimization of ultrasound assisted extraction of protein from sunflower meal and its physicochemical and functional properties. *Journal of Food Process Engineering*, 41(5), Article e12799. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12799>
 21. Mondor, M., Hernández-Álvarez, A. J. (2022). Processing technologies to produce plant protein concentrates and isolates. Chapter in a book: *Plant Protein Foods*. London-Berlin: Springer Nature, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91206-2_3
 22. Joshi, V.K., Kumar, S. (2015). Meat analogues: Plant based alternatives to meat products – A review. *International Journal of Food and Fermentation Technology*, 5(2), 107–119. <https://doi.org/10.5958/2277-9396.2016.00001.5>
 23. Kumar, P., Sharma, B., Kumar, R.R., Kumar, A. (2012). Optimization of the level of wheat gluten in analogue meat nuggets. *Indian Journal of Veterinary Research*, 21(1), 54–59.
 24. Onwezen, M. C., Bouwman, E. P., Reinders, M. J., Dagevos, H. (2021). A systematic review on consumer acceptance of alternative proteins: Pulses, algae, insects, plant-based meat alternatives, and cultured meat. *Appetite*, 159, Article 105058. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2020.105058>
 25. Xia, W., Botma, T.E., Sagis, L.M.C., Yang, J. (2022). Selective proteolysis of β -conglycinin as a tool to increase air-water interface and foam stabilising properties of soy proteins. *Food Hydrocolloids*, 130(3), Article 107726. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107726>
 26. Yolandanı, Y., Ma, H., Li, Y., Liu, D., Zhou, H., Liu, X. et al. (2023). Ultrasound-assisted limited enzymatic hydrolysis of high concentrated soy protein isolate: Alterations on the functional properties and its relation with hydrophobicity and molecular weight. *Ultrasonics Sonochemistry*, 95, Article 106414. <https://doi.org/10.1016/j.ultrsonch.2023.106414>
 27. Di, A., Li, L. (2020). The effect of limited proteolysis by trypsin on the formation of soy protein isolate nanofibrils. *Journal of Chemistry*, 4–5, Article 185037. <https://doi.org/10.1155/2020/185037>
 28. Kolpakova, V. V., Chumikina, L. V., Arabova, L. I., Lukin, D. N., Topunov, A. F., Titov, E. I. (2016). Functional technological properties and electrophoretic composition of modified wheat gluten. *Foods and Raw Materials*, 4(2), 48–57. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-2-48-57>
 29. Pourmohammadi, K., Elahe, A. (2021). Hydrolytic enzymes and their directly and indirectly effects on gluten and dough properties: An extensive review. *Food Science and Nutrition*, 9(12), 3988–4006. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2544>
 30. Kolpakova, V. V., Chumikina, L. V., Vasil'ev, A. V., Arabova, L. I., Topunov, A. F. (2014). Wheat gluten proteolysis by enzyme preparations of directional action. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 5(2), 72–86.
 31. Merz, M., Kettner, L., Langolf, E., Appel, D., Blank, I., Stressler, T. et al. (2016). Production of wheat gluten hydrolysates with reduced antigenicity employing enzymatic hydrolysis combined with downstream unit operations. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(10), 3358–3364. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7515>
 32. Mika, M., Wiekiera, A. (2024). Enzymatic hydrolysis as an effective method for obtaining wheat gluten hydrolysates combining beneficial functional properties with health-promoting potential. *Molecules*, 29(18), Article 4407. <https://doi.org/10.3390/molecules29184407>
 33. Kieliszek, M., Misiewicz, A. (2014). Microbial transglutaminase and its application in the food industry. A review. *Folia Microbiologica*, 59(3), 241–250. <https://doi.org/10.1007/s12223-013-0287-x>
 34. Akbari, M., Razavi, S.H., Kieliszek, M. (2021). Recent advances in microbial transglutaminase biosynthesis and its application in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 110, 458–469. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.036>
 35. Kolotylo, V., Piuowarek, K., Kieliszek, M. (2023). Microbiological transglutaminase: Biotechnological application in the food industry. *Open Life Science*, 18(1), Article 20220737. <https://doi.org/10.1515/biol-2022-0737>
 36. Sorapukdee, S., Tangwatcharin, P. (2018). Quality of steak restructured from beef trimmings containing microbial transglutaminase and impacted by freezing and grading by fat level. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(1), 129–137. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0170>
 37. Lesiow, T., Rentfrow, G. K., Xiong, Y. L. (2017). Polyphosphate and myofibrillar protein extract promote transglutaminase-mediated enhancements of rheological and textural properties of PSE pork meat batters. *Meat Science*, 128, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.02.002>
 38. Santhi, D., Kalaikannan, A., Malairaj, P., Prubhu, A. (2017). Application of microbial transglutaminase in meat foods: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(10), 2071–2076. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.945990>
 39. Carballo, J., Ayo, J., Colmenero, F.J. (2006). Microbial transglutaminase and caseinate as cold set binders: Influence of meat species and chilling storage. *LWT – Food Science and Technology*, 39(6), 692–699. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.03.020>
 40. Abou-Soliman, N. H. I., Sakr, S. S., Awad, S. (2017). Physico-chemical, microstructural and rheological properties of camel-milk yogurt as enhanced by microbial transglutaminase. *Journal of Food Science and Technology*, 54(6), 1616–1627. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2593-9>
 41. Gharibzadeh, S. M. T., Koubaa, M., Barba, F. J., Greiner, R., George, S., Roohinejad, S. (2018). Recent advances in the application of microbial transglutaminase cross linking in cheese and ice cream products: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107(Pt B), 2364–2374. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.115>
 42. D'Alessandro, A. G., Martemucci, G., Faccia, M. (2021). Effects of microbial transglutaminase levels on donkey cheese production. *Journal of Dairy Research*, 88(3), 351–356. <https://doi.org/10.1017/S0022029921000601>
 43. Darnay, L., Miklós, G., Lórinç, A., Szakmár, K., Pásztor-Huszár, K., Laczay, P. (2022). Possible inhibitory effect of microbial transglutaminase on the formation of biogenic amines during Trappist cheese ripening. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 39(3), 580–587. <https://doi.org/10.1080/19440049.2021.2005851>
 44. Palmeira, K. R., Rodrigues, B. L., Gaze, L. V., Freitas, M. Q., Teixeira, C. E., Marisco, E. T. et al. (2014). Use of transglutaminase, soybean waste and salt replacement in the elaboration of trout (*Oncorhynchus mykiss*) meatball. *International Food Research Journal*, 21(4), 1597–1602.
 45. Yuan, F., Lv, L., Li, Z., Mi, N., Chen, H., Lin, H. (2017). Effect of transglutaminase-catalyzed glycosylation on the allergenicity and conformational structure of shrimp (*Metapenaeus ensis*) tropomyosin. *Food Chemistry*, 219, 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.139>
 46. Bellido, G., Hatcher, D. W. (2011). Effects of a cross-linking enzyme on the protein composition, mechanical properties, and microstructure of Chinese-style noodles. *Food Chemistry*, 125(3), 813–822. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.08.008>
 47. Niu, M., Hou, G. G., Kindelspire, J., Krishnan, P., Zhao, S. (2017). Microstructural, textural, and sensory properties of whole-wheat noodle modified by enzymes and emulsifiers. *Food Chemistry*, 223, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.021>
 48. Ogilvie, O., Roberts, S., Sutton, K., Larsen, N., Gerrard, J., Domigan, L. (2020). The use of microbial transglutaminase in a bread system: A study of gluten protein structure, deamidation state and protein digestion. *Food Chemistry*, 340, Article 127903. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127903>
 49. Escamilla-García, M., Ríos-Romo, R. A., Melgarejo-Mancilla, A., Díaz-Ramírez, M., Hernández-Hernández, H. M., Amaro-Reyes, A. et al. (2020). Rheological and antimicrobial properties of chitosan and quinoa protein filmogenic suspensions with thyme and rosemary essential oils. *Foods*, 9(11), Article 1616. <https://doi.org/10.3390/foods9111616>
 50. Uresti, R.M., Téllez-Luis, S.J., Ramírez, J.A., Vázquez, M. (2004). Use of dairy products and microbial transglutaminase to obtain low-salt fish products from filleting waste from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*). *Food Chemistry*, 86(2), 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.033>
 51. Martínez, B., Miranda, J.M., Franco, C.M., Cepeda, A., Vázquez, M. (2011). Evaluation of transglutaminase and caseinate for a novel formulation of beef patties enriched in healthier lipid and dietary fiber. *LWT – Food Science and Technology*, 44(4), 949–956. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.11.026>
 52. Giosafatto, C. V. L., Al-Asmar, A., Mariniello, L. (2018). Transglutaminase protein substrates of food interest. Chapter in a book: *Enzymes in food technology*. Singapore: Springer, 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1933-4_15
 53. Jaros, D., Heidig, C., Rohm, H. (2007). Enzymatic modification through microbial transglutaminase enhances the viscosity of stirred yogurt. *Journal of Texture Studies*, 38(2), 179–198. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2007.00093.x>
 54. Fenoll, L. G., Rodríguez-López, J. N., García-Sevilla, F., García-Ruiz, P. A., Varón, R., García-Cánovas, F. et al. (2001). Analysis and interpretation of the action mechanism of mushroom tyrosinase on monophenols and diphenols generating highly unstable o-quinones. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Protein Structure and Molecular Enzymology*, 1548(1), 1–22. [https://doi.org/10.1016/s0167-4838\(01\)00207-2](https://doi.org/10.1016/s0167-4838(01)00207-2)
 55. Ito, S., Sugumaran, M., Wakamatsu, K. (2020). Chemical reactivities of ortho-quinones produced in living organisms: Fate of quinonoid products formed by tyrosinase and phenoloxidase action on phenols and catechols. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(17), Article 6080. <https://doi.org/10.3390/ijms21176080>
 56. Kumar, C. M., Sathisha, U.V., Dharmesh, S., Rao, A.G.A., Singh, S.A. (2011). Interaction of sesamol (3,4-methylenedioxyphenol) with tyrosinase and its effect on melanin synthesis. *Biochimie*, 93(3), 562–569. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2010.11.014>
 57. Arias, S., Amini, S., Horsch, J., Pretzler, M., Rompel, A., Melnyk, I. et al. (2020). Toward artificial mussel-glu proteins: Differentiating sequence modules for adhesion and switchable cohesion. *Angewandte Chemie, International Edition*, 59(42), 18495–18499. <https://doi.org/10.1002/anie.202008515>
 58. Krüger, J. M., Börner, H. G. (2021). Accessing the next Generation of synthetic mussel-glu polymers via mussel-inspired polymerization. *Angewandte Chemie, International Edition*, 60(12), 6408–6413. <https://doi.org/10.1002/anie.202015833>
 59. Fernandes, M. S., Kerkar, S. (2017). Microorganisms as a source of tyrosinase inhibitors: A review. *Annals of Microbiology*, 67, 343–358. <https://doi.org/10.1007/s13213-017-1261-7>
 60. Virginia, B.A., Apetrei, C. (2023). Tyrosinase immobilization strategies for the development of electrochemical biosensors – A review. *Nanomaterials*, 13(4), Article 760. <https://doi.org/10.3390/nano13040760>
 61. Семенов, Г. В., Краснова, И. С. (2021). Сублимационная сушка. М.: ДеЛи, 2021. [Semenov, G. V., Krasnova, I. S. (2021). Freeze-drying. Moscow: DeLi, 2021. (In Russian)]
 62. Ванин, С. В., Колпакова, В. В. (2007). Функциональные свойства сухой пшеничной клейковины разного качества. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 1(296), 21–24. [Vanin, S. V., Kolpakova, V. V. (2007). Functional properties of dry wheat gluten of different quality. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 1(296), 21–24. (In Russian)]
 63. Колпакова, В. В., Крикунова, Л. Н., Кононенко, В. В. (2001). Исследование возможности получения белковых препаратов из дифференцированных фракций зерна ржи и ячменя. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 5–6(264–265), 35–39. [Kolpakova, V. V., Krikunova, L. N., Kononenko, V. V. (2001). Study of the possibility of producing protein preparations from differentiated fractions of rye and barley grain. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 5–6(264–265), 35–39. (In Russian)]
 64. Андреев, Н. Р., Колпакова, В. В., Гольдштейн, В. Г. (2018). К вопросу глубокой переработки зерна тритикале. *Пищевая промышленность*, 9, 30–33. [Andreev, N. R., Kolpakova, V. V., Goldstein, V. G. (2018). To the question of profound triticale grain processing. *Food Industry*, 9, 30–33. (In Russian)]
 65. Buchert, J., Ercili-Cura, D.E., Ma, H., Gasparetti, C., Monogioudi, E., Faccioet, G. et al. (2010). Crosslinking food proteins for improved functionality. *Annual Review of Food Science and Technology*, 1(1), 113–138. <https://doi.org/10.1146/annurev.food.080708.100841>
 66. Zimoch-Korzycka, A., Krawczyk, A., Król-Kilińska, Ż., Kulig, D., Bobak, Ł., Jarmluk, A. (2024). Influence of microbial transglutaminase on the formation of physico-chemical properties of meat analogs. *Foods*, 13(24), Article 4085. <https://doi.org/10.3390/foods13244085>
 67. Zo, S. M., Sood, A., Won, S. Y., Choi, S. M., Han, S. S. (2025). Structuring the future of cultured meat: Hybrid gel-based scaffolds for edibility and functionality. *Gels*, 11(8), Article 610. <https://doi.org/10.3390/gels11080610>

68. Baugreet, S., Kerry, J. P., Brodtkorb, A., Gomez, C., Auty, M., Allen P. et al. (2018). Optimisation of plant protein and transglutaminase content in novel beef re-structured steaks for older adults by central composite design. *Meat Science*, 142, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.03.024>
69. Partanen, R., Torkkeli, M., Hellman, M., Permi, P., Serimaa, R., Buchert, J. et al. (2011). Loosening of globular structure under alkaline pH affects accessibility of β -lactoglobulin to tyrosinase-induced oxidation and subsequent cross-linking. *Enzyme and Microbial Technology*, 49(2), 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2011.04.010>
70. Madsen, M., Khan, S., Kunstmann, S., Aachmann, F. L., Ipsen, R., Westh, P. et al. (2022). Unaided efficient transglutaminase cross-linking of whey proteins strongly impacts the formation and structure of protein alginate particles. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 5, Article 100137. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100137>
71. Nivala, O., Mäkinen, O.E., Kruus, K., Nordlund, E., Ercili-Cura, D. (2017). Structuring colloidal oat and faba bean protein particles via enzymatic modification. *Food Chemistry*, 231, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.114>
72. Marco, C., Pérez, G., Ribotta, P., Rosell, C.M. (2007). Effect of microbial transglutaminase on the protein fractions of rice, pea and their blends. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(14), 2576–2582. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3006>
73. Tang, C. H., Sun, X., Yin, S. W., Ma, C. Y. (2008). Transglutaminase induced cross-linking of vicilin-rich kidney protein isolate: Influence on the functional properties and in vitro digestibility. *Food Research International*, 41(10), 941–947. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.07.015>
74. Queirós, R.P., Moreira, N., Pinto, C.A., Fidalgo, L.G., Saraiva, J.A., Lopes da Silva, J.A. (2024). Influence of high-pressure processing and microbial transglutaminase on the properties of pea protein isolates. *Macromol*, 4(2), 213–226. <https://doi.org/10.3390/macromol4020011>
75. Glusac, J., Isaschar-Ovdat, S., Fishman, A. (2020). Transglutaminase modifies the physical stability and digestibility of chickpea protein-stabilized oil-in-water emulsions. *Food Chemistry*, 315, Article 126301. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126301>
76. de Barros Soares, L.H., Albuquerque, P.M., Assmann, F., Ayub, M.A.Z. (2004). Physical properties of three food proteins treated with transglutaminase. *Ciencia Rural*, 34(4), 1219–1223. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000400039>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Колпакова Валентина Васильевна — доктор технических наук, профессор, заведующий отделом биотехнологии комплексной переработки крахмалосодержащего сырья, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья — филиал «Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха» 140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11 E-mail: Val-kolpakova@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-8569 * автор для контактов</p> <p>Гайворонская Ирина Сергеевна — соискатель, отдел биотехнологии комплексной переработки крахмалосодержащего сырья, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья — филиал «Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха» 140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11 E-mail: irina_ivahnenko@bk.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4036-1316</p> <p>Гулакова Валентина Андреевна — научный сотрудник, отдел биотехнологии комплексной переработки крахмалосодержащего сырья, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья — филиал «Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха» 140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11 E-mail: gulakovava@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8393-9256</p> <p>Семенов Геннадий Вячеславович — доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник, лаборатория композитных материалов, ЦКП «Перспективные упаковочные решения и технологии рециклинга», Российский биотехнологический университет 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 E-mail: sgV47@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2320-9985</p> <p>Цурикова Нина Васильевна — кандидат технических наук, заведующая лабораторией биотехнологии новых продуцентов гидролитических ферментов, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи 111033, Москва, Самокатная ул., 4-Б E-mail: nina.tsurikova@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9609-0818</p> <p>Синицын Аркадий Пантелеймонович — доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией биохимии ферментов, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук 111033, Москва, Ленинский проспект, 33, кор. 2 заведующий лабораторией физико-химии ферментативной трансформации полимеров, кафедры химической энзимологии, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова 119991, Москва, Ленинские горы, 1, строение 3 E-mail: apsinityn@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6234-5395</p>	<p>Valentina V. Kolpakova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Biotechnology for the Complex Processing of Starch-Containing Raw Materials, Chief Researcher, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre 11, Nekrasov str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia E-mail: Val-kolpakova@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-8569 * corresponding author</p> <p>Irina S. Gaivoronskaya, Graduate Applicant, Department of Biotechnology for the Complex Processing of Starch-Containing Raw Materials, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre 11, Nekrasov str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia E-mail: irina_ivahnenko@bk.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4036-1316</p> <p>Valentina A. Gulakova, Scientific Researcher, Department of Biotechnology for the Complex Processing of Starch-Containing Raw Materials, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre 11, Nekrasov str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia E-mail: gulakovava@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8393-9256</p> <p>Gennadiy V. Semenov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Laboratory of Composite Materials, Center for Collective Use “Advanced Packaging Solutions and Recycling Technologies”, Russian Biotechnological University 11, Volokolamskoe highway, 125080, Moscow, Russia E-mail: sgV47@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2320-9985</p> <p>Nina V. Tsurikova — Candidate of Technical sciences, Head of the Laboratory of Biotechnology of New Producers of Hydrolytic Enzymes, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology — branch of the Federal State Budgetary Institution “Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety” 4-B, Samokatnaya str., Moscow, 111033, Russia E-mail: nina.tsurikova@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9609-0818</p> <p>Arkady P. Sinityn, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Enzyme Biochemistry, Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology” of the Russian Academy of Sciences 33, Building 2, Leninsky Prospect, 111033, Moscow, Russia Head of the Laboratory of Physical Chemistry of Enzymatic Transformation of Polymers, Department of Chemical Enzymology, Lomonosov Moscow State University 1, building 3, Leninskiye Gory, 119991, Moscow, Russia E-mail: apsinityn@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6234-5395</p>
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-54-61>



Поступила 23.05.2025

Поступила после рецензирования 18.02.2026

Принята в печать 05.03.2026

© Белявская И. Г., Дубцова Г. Н., Осипчук И. Р., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА ХРАНЕНИЯ ПШЕНИЧНО-КЕДРОВОЙ МУКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ АНТИОКСИДАНТНОЙ ЕМКОСТИ

Белявская И. Г. *, Дубцова Г. Н., Осипчук И. Р.

Российский биотехнологический университет, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

сырье, хлебопекарная промышленность, прогнозирование срока хранения, уравнение Аррениуса, характеристики качества, органолептические показатели, пищевая ценность

Представлены результаты исследований хранимоспособности, а также антиоксидантные характеристики композитной пшенично-кедровой муки и хлебобулочных изделий, выработанных на ее основе. Установлено, что разработанная технология получения композитной пшенично-кедровой муки обеспечивает повышение содержания жира в 4,5 раза и белка на 9,6% по сравнению с контрольной пробой муки без добавления ореха. Изделия из композитной муки приобретают характерный кедровый аромат, что положительно влияет на их органолептическую оценку. Проведенная сравнительная характеристика показателей качества лабораторных проб пшеничной и композитной пшенично-кедровой муки показала, что внесение ядер кедрового ореха снижает показатели влажности, белизны, числа падения и содержания клейковины, а также изменяет ее характеристики в сторону расслабления и большей растяжимости. Выявлен характер изменения показателя кислотного числа жира (КЧЖ) пшеничной и пшенично-кедровой муки при хранении в течение 180 суток при температурах $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$, $30 \pm 0,5^\circ\text{C}$ и $40 \pm 0,5^\circ\text{C}$, что позволило спрогнозировать сроки хранения композитной пшенично-кедровой муки. Установлено, что применение ядер кедрового ореха в составе композитной пшенично-кедровой муки не повышает прирост показателя КЧЖ. Прогнозируемый срок хранения композитной пшенично-кедровой муки составил не менее 8 месяцев. Установлены антиоксидантные характеристики композитной пшенично-кедровой муки: значения составили $0,32 \pm 0,03$ и $5,22 \pm 0,14$ мкмоль ТЭГ/г с.в. для липофильной и гидрофильной фракций соответственно. Для проб хлебобулочных изделий, выработанных на ее основе, значение Prior-критерия составило 0,26, что превышает аналогичные показатели для пшеничных изделий из цельнозерновой муки (0,10) и из пшеничной хлебопекарной муки 1-го сорта (0,07). Таким образом, композитная пшенично-кедровая мука может быть рекомендована для промышленного производства и выработки продукции повышенной пищевой ценности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при поддержке ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)».

Received 23.05.2025

Accepted in revised 18.02.2026

Accepted for publication 05.03.2026

© Belyavskaya I. G., Dubtsova G. N., Osipchuk I. R., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

PREDICTION OF THE SHELF LIFE OF WHEAT-CEDAR FLOUR AND DETERMINATION OF ITS ANTIOXIDANT CAPACITY

Irina G. Belyavskaya*, Galina N. Dubtsova, Ivan R. Osipchuk

Russian Biotechnological University, Moscow, Russia

KEYWORDS:

raw materials, bakery industry, shelf life prediction, Arrhenius equation, quality characteristics, organoleptic properties, nutritional value

ABSTRACT

The results of storability studies, as well as antioxidant characteristics of composite wheat-cedar flour and bakery products produced on its basis, are presented. It has been established that the developed technology for producing composite wheat-cedar flour provides an increase in fat content by 4.5 times and protein by 9.6% compared to a control sample of flour without nuts. Products made from composite flour acquire a characteristic cedar aroma, which positively influences their organoleptic assessment. A comparative analysis of the quality indicators of laboratory samples of wheat and composite wheat-cedar flour showed that the addition of pine nut kernels reduces the moisture content, whiteness, falling number, and gluten content, and changes its characteristics in the direction of relaxation and greater extensibility. The character of the change in the acid value of fat (AVF) of wheat and wheat-cedar flour during storage for 180 days at temperatures of 20 ± 0.5 , 30 ± 0.5 and $40 \pm 0.5^\circ\text{C}$ was revealed, which made it possible to predict the shelf life of composite wheat-cedar flour. It has been established that the use of pine nut kernels in the composition of composite wheat-pine nut flour does not increase the growth of the AVF indicator. The predicted shelf life of the composite wheat-cedar flour is at least 8 months. The antioxidant properties of composite wheat-cedar flour were established, revealing values of 0.32 ± 0.03 and 5.22 ± 0.14 $\mu\text{mole TEAC/g DM}$ for the lipophilic and hydrophilic fractions, respectively. For the samples of bakery products produced on its basis, the Prior criterion value was 0.26, which exceeds similar values for wheat products made from whole grain flour (0.10) and from grade 1 wheat bakery flour (0.07). Thus, composite wheat-cedar flour can be recommended for industrial production and the manufacture of products with increased nutritional value.

FUNDING: The study was carried out with the support of the Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH).

1. Введение

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» к важнейшим критическим наукоемким технологиям относятся технологии персонализированного, лечебного и функционального питания, направленные на здоровьесбережение

населения. Перспективы разработки технологий продуктов функционального питания базируются на применении источников пищевых и биологически активных веществ, в том числе возобновляемых ресурсов растительного происхождения.

В качестве возобновляемых ресурсов растительного сырья, обладающих высокими показателями пищевой ценности, интерес представляют семена растений, рода *Pinus*, насчитывающего 29 съедобных

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Белявская, И. Г., Дубцова, Г. Н., Осипчук, И. Р. (2026). Прогнозирование срока хранения пшенично-кедровой муки и определение её антиоксидантной емкости. *Пищевые системы*, 9(1), 54–61. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-54-61>

FOR CITATION: Belyavskaya, I. G., Dubtsova, G. N., Osipchuk, I. R. (2026). Prediction of the shelf life of wheat-cedar flour and determination of its antioxidant capacity. *Food Systems*, 9(1), 54–61. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-54-61>

видов, представленных в обзоре¹. Использование ядер семян кедровой сосны сибирской (*Pinus sibirica*) и дальневосточной (*Pinus koraiensis*), называемых кедровыми орехами, в России и за рубежом обусловлено их химическим составом и показателями пищевой ценности [1–3].

Ядра кедрового ореха характеризуются значительным содержанием пищевых и биологически активных веществ: белка — до 23% и жира — до 66,3%. Жиры содержат дельта-5-нелеиноновые жирные кислоты, включая пиноленовую кислоту, доля которой составляет 14–24% от общего количества жирных кислот. Пиноленовая кислота, являющаяся изомером γ -линолевой кислоты, характеризуется нерегулярным расположением двойных связей, признана таксонометрическим маркером растений семейства *Pinaceae* [4]. Наличие биологически активных соединений кедрового ореха, с одной стороны, обуславливает противовоспалительные эффекты и полезные метаболические изменения при их употреблении [5–7], а с другой — необходимость контроля показателей качества пищевой продукции при хранении.

Для повышения хранимостепробности продуктов применяются различные способы обработки растительного сырья [8,9]. Современные тенденции, нацеленные на потребление продуктов здорового питания, создают необходимость в разработке безопасной продукции, сохраняющей высокие показатели качества на протяжении всего срока хранения.

Разработка технологических решений использования продуктов переработки кедрового ореха осуществляется в различных отраслях пищевой промышленности. Авторами [10] разработан желеобразный мармелад с ядрами кедровых орехов в количестве 9% к массе сахара, что незначительно влияет на показатели кислотности, массовой доли влаги и количества нерастворимой золы. Изделие характеризуется повышенным содержанием белка, жира, пищевых волокон, минеральных элементов и витаминов группы В.

Ученые Красноярского государственного аграрного университета [11] на основе изучения показателей качества и безопасности полутвердого сыра установили рекомендуемую дозировку кедровой муки в количестве 7%, обеспечивающую высокие показатели качества продукции. С использованием принципов пищевой комбинаторики разработан ореховый напиток, произведенный из смеси ядер и жмыха ореха в соотношении 20:80 с гидромодулем 1:7. Продукт обладает оптимальными характеристиками вязкости (3,96 мПа·с) и сбалансированным составом пищевых веществ [12]. Проведенными исследованиями [13] установлено рациональное содержание кедрового жмыха в рецептуре печенья «Кедровое» при частичной замене сливочного масла с сохранением потребительских свойств продукции, составившее 6–8% к рецептурному количеству сливочного масла на 100 кг выхода готовых изделий. Включение в рецептуру смеси полуобезжиренных и обезжиренных кедровых орехов обеспечило получение мучных кондитерских изделий повышенной биологической ценности с высокими органолептическими и физико-химическими характеристиками, которые могут быть рекомендованы для функционального питания. Исследователями Кубанского государственного технологического университета выявлена целесообразность применения кедровых орехов в производстве заварных пряников и функциональных мучных кондитерских изделий [14,15]. В научной литературе приведены результаты исследований по применению порошка из жмыха кедрового ореха в хлебопекарном производстве [16], обоснована рецептура и представлена технологическая схема производства продукции с внесением 15% исследуемого продукта в рецептуру хлебобулочного изделия. Разработка инновационных продуктов питания с применением кедровых орехов происходит не только в Российской Федерации, но и за рубежом [17,18].

Технологические аспекты разработки продуктов функционального питания обусловлены формированием стабильных качественных характеристик продукции, обладающей антиоксидантными и геродиетическими свойствами [19]. Вопросам безопасности кедровых орехов уделяется большое внимание [20,21]. Применение методов спектроскопии в ближнем инфракрасном диапазоне и анализ физических характеристик цифровых изображений ядер кедровых орехов позволяют идентифицировать сортовые особенности и проследивать географический ареал их произрастания, что способствует стабилизации качественных характеристик продукции [22].

Вектор, обеспечивающий стабильность качественных показателей продукции функционального питания, направлен на применение сбалансированных композитных смесей [23,24] заданного состава. Композитные мучные смеси, полученные технологией совместного помола зерна пшеницы и ядер кедрового ореха, лежат в основе современных технологических решений [25] и представляют интерес для потребителей, предпочитающих натуральные продукты растительного происхождения.

Для практического применения композитных мучных смесей необходимо получение достоверной информации о сроке их хранения. В соответствии с ГОСТ Р 51074–2003² срок хранения — период, в течение которого пищевой продукт при соблюдении установленных условий хранения сохраняет свойства, указанные в нормативном или техническом документе. Истечение срока хранения не означает, что продукт не пригоден для использования по назначению. Изменение показателей качества композитных смесей в отрицательную сторону может быть связано с количественными изменениями одного или нескольких параметров. Например, с изменением содержания нутриентов, ухудшением органолептических показателей или микробиологической порчей. Разработанные композитные смеси, являющиеся продукцией длительного хранения, требуют оценки предполагаемой хранимостепробности.

Для определения прогнозируемого срока хранения таких продуктов применяют метод ASLT (Accelerated shelf-life testing), который успешно реализуется для оценки срока хранения различных продуктов [26], в том числе муки [27,28], и позволяет значительно сократить объем экспериментальных данных.

Основные преимущества метода тестирования срока хранения заключаются в получении надежных данных о процессе порчи за короткий период времени и прогнозировании фактического срока хранения продукта. Прогнозирование осуществляется путем разработки кинетической модели, в которой должен присутствовать температурный фактор, оказывающий значительное влияние на скорость протекания химических реакций [27]. Широко используемый метод ускоренного испытания срока хранения включает исследование продукта с использованием уравнения Аррениуса при повышенных температурах и экстраполяцию кинетических результатов на обычные условия хранения.

В основе метода тестирования сроков хранения лежит определение показателя кислотного числа жира (КЧЖ) — критерия доброкачественности муки [29] и мучных смесей.

Целью настоящей работы является определение хранимостепробности и антиоксидантных свойств композитной пшенично-кедровой муки.

- Для реализации поставленной цели решали следующие задачи:
- провести сравнительную характеристику показателей качества лабораторных проб пшеничной и композитной пшенично-кедровой муки;
 - определить влияние продолжительности хранения при различных температурных параметрах на показатель КЧЖ пшеничной и пшенично-кедровой муки;
 - провести пробные лабораторные выпечки и определить показатели качества хлебобулочных изделий, приготовленных из проб композитной муки с различными сроками хранения;
 - установить прогнозируемый срок хранения исследуемых проб композитной муки;
 - определить антиоксидантную емкость композитной муки и проб хлебобулочных изделий, выработанных на ее основе.

2. Объекты и методы

Объектами исследований являлись: проба зерна мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) урожая 2023 года; проба орехов кедровых очищенных урожая 2023 года (Новосибирская область РФ); образцы муки пшеничной и муки композитной пшенично-кедровой с дозировкой ядер кедрового ореха в количестве 10%, произведенные в лабораторных условиях; образцы хлебобулочных изделий, выработанные в лабораторных условиях.

При проведении исследований использовали зерно пшеницы по ГОСТ 9353–2016³, орехи кедровые очищенные по ГОСТ 31852–2012⁴, дрожжи прессованные хлебопекарные

² ГОСТ Р 51074–2003 «Продукты пищевые. Информация для потребителя. Общие требования». Москва: Стандартинформ, 2019. — 25 с. (с изменениями от 15.12.2009)

³ ГОСТ 9353–2016 «Пшеница. Технические условия». Москва: Стандартинформ, 2019. — 12 с.

⁴ ГОСТ 31852–2012 (ISO 6756:1984) «Орехи кедровые очищенные. Технические условия». Москва: Стандартинформ, 2014. — 13 с.

¹ Pine Nuts (2024). Электронный ресурс: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/pine-nuts>. Дата доступа 15.09.2025

по ГОСТ 171-2015⁵, соль пищевую по ГОСТ Р 51574–2018⁶, воду питьевую по СанПиН 2.1.4.1074–01⁷.

Определение природы зерна проводили в соответствии с ГОСТ 10840-2017⁸. Показатель зольности определялся по ГОСТ 10847-2019⁹. Для исследования стекловидности зерна использовали диафаноскоп ДС3–2М («МОТТЕХ», Россия) и методику ГОСТ 10987-76¹⁰; при определении показателей качества клейковины применяли устройство ПФК-1 («МОТТЕХ», Россия) и прибор ИДК-3М («ПЛАУН-системы», Россия), оценку проводили по ГОСТ Р 54478–2011¹¹.

Пробы пшеничной и композитной пшенично-кедровой муки получали в лабораторных условиях в процессе помола дробленого зерна пшеницы, смеси дробленого зерна пшеницы и ядер кедровых орехов с использованием центробежного измельчителя High Speed Multifunctional Grinder CE (JUSTBUY, Китай) с заданным скоростным режимом вращения ударных лопастей 36000 об/мин. Дробленое зерно пшеницы предварительно получали с использованием схемы, приведенной в работе [30]. Применение указанного оборудования позволило сократить технологические этапы размола и получить пробы композитной муки с направленными функциональными показателями.

Оценку показателей качества лабораторных проб муки проводили по следующим параметрам: влажность — по ГОСТ 9404-88¹², белизна — по ГОСТ 26361-2013¹³, клейковина — по ГОСТ 27839-2013¹⁴, число падения — по ГОСТ ISO 3093–2016¹⁵.

Общее количество липидов определяли по ГОСТ 29033-91¹⁶.

Кислотное число жира (КЧЖ) проб муки определяли титриметрическим методом, основанным на установлении количества свободных жирных кислот в анализируемом образце выделенного жира из навески исследуемого объекта по ГОСТ 31700-2012¹⁷.

Приготовление хлебобулочных изделий осуществляли безопарным способом по рецептуре, представленной в Таблице 1. Длительность брожения теста составляла 90 минут, масса заготовки — 450±0,1 г, продолжительность расстойки — 40–45 минут при температурных режимах 38±2 °С; продолжительность выпечки составляла 25 минут при температуре 180–210 °С. Готовые изделия охлаждали при температуре 25±2 °С. При реализации пробных лабораторных выпечек применяли следующее оборудование: тестомесильная машина спиральная электрическая ТМС-40НН-1Р серии LIGHT (Abat, Россия), шкаф АВАТ ШРТ-12 (Abat, Россия), конвекционная печь КЭП-4Э (Abat, Россия).

Оценку показателей качества хлебобулочных изделий осуществляли общепринятыми¹⁸ и специальными органолептическими и физико-химическими методами. Влажность хлебобулочных изделий определяли в соответствии с ГОСТ 21094-2022¹⁹, формоустойчи-

вость хлебобулочных изделий — по ГОСТ 27229-88¹⁸. Массу изделий определяли взвешиванием на весах лабораторных МВП (Cas, Южная Корея). Объем хлебобулочных изделий определяли при помощи объемного устройства. Удельный объем изделий определяли по отношению объема к массе. Пористость мякиша по ГОСТ 5669-96²⁰, кислотность — в соответствии с ГОСТ 5670-96²¹. Качество изделий оценивали по 100-балльной системе с учетом физических и органолептических показателей, которые определяли по 5-балльной шкале с учетом коэффициентов весомости.

Таблица 1. Рецептура пшеничных и пшенично-кедровых хлебобулочных изделий

Table 1. Recipe for wheat and wheat-cedar bakery products

Наименование компонента рецептуры	Количество компонента, %
Мука (контрольная или пшенично-кедровая)	100
Соль пищевая	1,0
Дрожжи прессованные	2,0
Вода питьевая	по расчету

Хранение муки проводили в климатических камерах при температурных режимах 20±0,5 °С, 30±0,5 °С и 40±0,5 °С. Относительная влажность воздуха при всех значениях температур не превышала 70%. Для оценки качества муки при хранении использовали кислотное число жира и органолептические показатели хлебобулочных изделий, выпеченных из проб муки с различным сроком хранения; определение проводили с периодичностью 30 суток.

Оценку прогнозируемого срока хранения пшенично-кедровой муки проводили методом ASLT с применением обоснованной модели Аррениуса, которая устанавливает зависимость константы скорости химической реакции от температуры и описывается уравнением Аррениуса:

$$k = A \cdot \exp(-Ea/RT), \quad (1)$$

где A — константа пропорциональности; Ea — энергия активации; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Для математической обработки результатов исследования нижний уровень органолептической оценки хлебобулочных изделий принят равным 60 баллам, КЧЖ — 50 мг КОН/г жира.

Определение прогнозируемого срока хранения пшенично-кедровой муки на основании результатов эксперимента проводили с использованием табличного процессора Microsoft Office Excel, методика расчета описана в работе [31].

Определение антиоксидантной емкости проб муки и хлебобулочных изделий проводили в научно-исследовательском центре «АкваХром» (Москва, Россия) с использованием 96-луночных несорбирующих микропланшетов из полистирола (Geiner Bio One, Германия) на многофункциональном фотометре-флуориметре Synergy 2 (BioTek, США). Длина волны составила 734 нм по методике, основанной на реакции обесцвечивания катион-радикала АБТС в гидрофильных и липофильных фракциях объектов. Оценку антиоксидантных характеристик проб хлебобулочных изделий проводили на основании Р-критерия.

При расчете среднего арифметического полученных экспериментальных данных (трехкратное повторение) оценивали их на однородность для исключения грубых ошибок. Математические зависимости определяли с применением метода наименьших квадратов (относительная ошибка измерений составила не более 1,78% при доверительной вероятности 0,95).

3. Результаты и обсуждение

Для получения проб композитной пшенично-кедровой муки было выбрано зерно пшеницы, характеристика которого приведена в Таблице 2. При определении качества пробы зерна пшеницы установлено, что значения показателей соответствовали стандарту ГОСТ 9353-2016.

Лабораторные образцы пшеничной муки, полученные без добавления кедрового ореха, имели показатели, приведенные в Таблице 3. Внесение кедрового ореха в помольную партию влияло на характеристики композитной пшенично-кедровой муки.

²⁰ ГОСТ 5669-96 «Хлебобулочные изделия. Методы определения пористости». Минск, Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2006. — 6 с.

²¹ ГОСТ 5670-96 «Хлебобулочные изделия. Методы определения кислотности». Минск, Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2006. — 6 с.

⁵ ГОСТ 171-2015 «Дрожжи хлебопекарные прессованные. Технические условия». Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. — 21 с.

⁶ ГОСТ Р 51574–2018 «Соль пищевая. Общие технические условия». Москва: Стандартинформ, 2018. — 8 с.

⁷ Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.1.4.1074–01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. Москва: Минздрав России, 2002.

⁸ ГОСТ 10840-2017 «Зерно. Метод определения природы». Москва: Стандартинформ, 2019. — 14 с.

⁹ ГОСТ 10847-2019 «Зерно. Метод определения зольности». Москва: Стандартинформ, 2019. — 20 с.

¹⁰ ГОСТ 10987-76 «Зерно. Метод определения стекловидности». Москва: Стандартинформ, 2009. — 6 с.

¹¹ ГОСТ Р 54478–2011 «Методы определения количества и качества клейковины». Москва: Стандартинформ, 2012. — 23 с.

¹² ГОСТ 9404-88 «Мука и отруби. Метод определения влажности». Москва: Стандартинформ, 2007. — 4 с.

¹³ ГОСТ 26361-88 «Мука. Метод определения белизны». Москва: Стандартинформ, 2014. — 16 с.

¹⁴ ГОСТ 27839-2013 «Мука пшеничная. Методы определения количества и качества клейковины». Москва: Стандартинформ, 2014. — 18 с.

¹⁵ ГОСТ ISO 3093–2016 «Зерно и продукты его переработки. Определение числа падения методом Хатберга-Пертена». Москва: Стандартинформ, 2019. — 12 с.

¹⁶ ГОСТ 29033-91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения жира». Москва: ИПК Издательство стандартов, 2009. — 6 с.

¹⁷ ГОСТ 31700-2012 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения кислотного числа жира». Москва: Стандартинформ, 2019. — 7 с.

¹⁸ ГОСТ 27669-88 «Мука пшеничная хлебопекарная. Метод пробной лабораторной выпечки хлеба». Москва: Стандартинформ, 2007. — 9 с.

¹⁹ ГОСТ 21094-2022 «Изделия хлебобулочные. Методы определения влажности». Москва: Российский институт стандартизации, 2022. — 12 с.

Таблица 2. Показатели качества зерна пшеницы

Table 2. Wheat grain quality indicators

Наименование	Значение или характеристика показателя
Класс пшеницы	3
Тип	I — мягкая яровая краснозерная
Подтип	3
Цвет	Свойственный здоровому зерну
Запах	Свойственный здоровому зерну пшеницы, без плесневелого, солодового, затхлого и других посторонних запахов
Количество клейковины, %	32,0±0,5
Качество клейковины, ед. ИДК (группа)	82±2,0 (II группа)
Число падения, с	325±2,0
Стекловидность, %	44±1
Натура, г/л	785±2
Влажность, %	12,6±0,5
Сорная примесь, %	0,04±0,01
Зерновая примесь, %	2,84±0,05

Таблица 3. Характеристики проб муки

Table 3. Characteristics of flour samples

Наименование показателя	Значение показателя муки	
	пшеничной	пшенично-кедровой
Влажность, %	12,6±1,5	11,8±1,5
Количество клейковины, %	32±2	25±2
Качество клейковины, ед. ИДК (группа)	80±2,5	88±2,5
Растяжимость, см	15±1	23±1
Белизна, ед. прибора	36,3±0,3	16,5±0,5
Число падения, с	325±8	208±7
Зольность, %	1,21±0,04	1,91±0,04
Содержание жиров, %	1,30±0,05	5,63±0,06
Содержание белка, %	10,27±0,05	10,88±0,05
Содержание моно и дисахаридов, %	1,99±0,05	2,23±0,05
Содержание крахмала, %	55,9±0,4	56,2±0,4
Содержание клетчатки, %	0,73±0,05	1,89±0,05

Внесение ядер кедрового ореха в помольную партию при получении композитной муки приводило к снижению показателя влажности пшенично-кедровой муки на 0,5%. Это объясняется гидрофобными свойствами орехового компонента, содержащего жир в количестве 30,2–49,2% [32]. Формирование композитной муки сопровождалось изменением характеристик отмываемой клейковины: снижалось ее содержание, структура клейковины ослабевала и она приобретала большую растяжимость. Такое изменение свойств глиадин-глютениновой фракции композитной муки обусловлено влиянием химического состава ореха, образованием липид-белковых фракций и изменением реологического поведения водонерастворимой белковой составляющей при выделении клейковины [33,34].

В помольной партии композитной муки содержалось 10% ядер кедрового ореха, что приводило к снижению показателя белизны на 19,8±0,5 ед. прибора по сравнению с пшеничной мукой, полученной при аналогичных технологических режимах измельчения. Это объясняется химическим составом орехового компонента, в частности отсутствием в нем крахмальных зерен [2,35]. Установлено, что значение числа падения композитной муки значительно снижалось (117±8 с), что обуславливает требования к исходным характеристикам перерабатываемого сырья при промышленном производстве композитной пшенично-кедровой муки для хлебопекарных целей.

Мука, в отличие от зернового сырья, характеризуется пониженной стойкостью при хранении. Продолжительное хранение муки оказывает большое влияние на изменение вкусовых параметров продукта, что происходит за счет гидролитических реакций различной интенсивности в липидной фракции муки. Расщепление молекул триглицеридов с образованием свободных жирных кислот, в том числе и ПНЖК, является причиной снижения порога восприятия вкуса и аромата, а также

появления посторонних привкусов, запахов или прогорклости. Исследование свежести муки проводили с применением инструментальной методики по изменению кислотного числа жира. На хранение были заложены два вида муки: контрольная пшеничная и пшенично-кедровая композитная. Основным параметром при хранении, который характеризует качество продукта и нормирует срок безопасного хранения, считается кислотное число жира.

Результаты изменения показателя КЧЖ при хранении лабораторных проб пшеничной и пшенично-кедровой муки приведены на Рисунке 1.

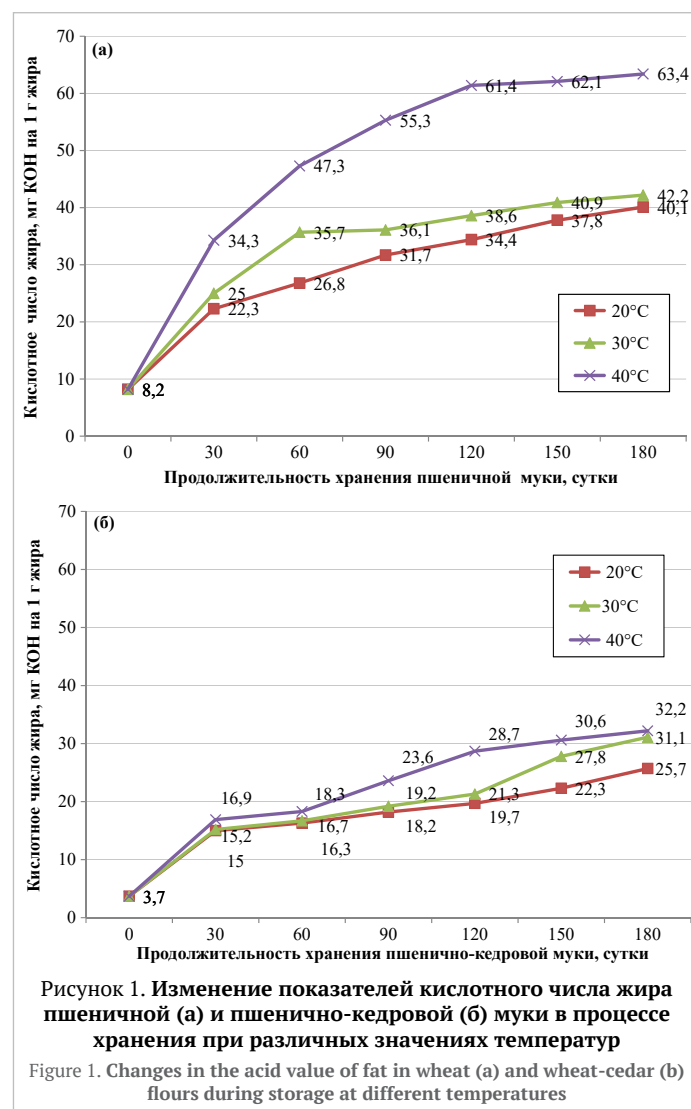


Рисунок 1. Изменение показателей кислотного числа жира пшеничной (а) и пшенично-кедровой (б) муки в процессе хранения при различных значениях температур

Figure 1. Changes in the acid value of fat in wheat (a) and wheat-cedar (b) flours during storage at different temperatures

С применением метода наименьших квадратов для математической обработки результатов проведенных исследований установили регрессионные зависимости влияния продолжительности хранения (x) лабораторных проб муки при различных температурных условиях на показатель КЧЖ вида:

$$y_1 = 10,267 + 0,324x - 0,0009x^2, \tag{1}$$

абсолютная средняя квадратическая погрешность составила 1,750; относительная — 0,870;

$$y_2 = 10,876 + 0,437x - 0,0015x^2, \tag{2}$$

абсолютная средняя квадратическая погрешность составила 2,770; относительная — 1,22;

$$y_3 = 10,95 + 0,731x - 0,0025x^2, \tag{3}$$

абсолютная средняя квадратическая погрешность составила 2,401; относительная — 0,725.

Обозначения y_1, y_2, y_3 — показатели КЧЖ проб пшеничной муки, хранение которых осуществлялось при температурах 20 °С, 30 °С, 40 °С соответственно; значения приведены в мг КОН на 1 г жира;

$$y_4 = 6,260 + 0,180x - 0,0004x^2, \tag{4}$$

абсолютная средняя квадратическая погрешность составила 2,152; относительная — 1,780;

$$y_5 = 6,286 + 0,173x - 0,0002x^2, \quad (5)$$

абсолютная средняя квадратическая погрешность составила 2,276; относительная — 1,686;

$$y_6 = 5,462 + 0,280x - 0,0007x^2, \quad (6)$$

абсолютная средняя квадратическая погрешность составила 1,820; относительная — 1,182;

Обозначения y_4, y_5, y_6 — показатели КЧЖ проб пшенично-кедровой муки, хранение которых осуществлялось при температурах 20 °С, 30 °С, 40 °С соответственно; значения приведены в мг КОН на 1 г жира; x — продолжительность хранения, сутки.

Проведенными исследованиями установили, что у образцов пшеничной муки КЧЖ имело более высокое значение (от 8,2 до 63,4 мг КОН на 1 г жира), чем у образцов композитной пшенично-кедровой муки (от 3,7 до 32,2 мг КОН на 1 г жира). Эти данные согласуются с результатами значений КЧЖ мелкой фракции кедрового ореха [36], которые не превышали 2 мг КОН на 1 г при хранении в течение 210 суток.

Наибольший прирост показателя КЧЖ зафиксировали у пшеничной муки при температуре 40 °С, вплоть до 63,4 мг КОН/г жира на 6-м месяце хранения, что характеризует интенсивность гидролиза жира в исследуемом образце.

Сравнительный анализ данных Рисунка 1 позволил установить постепенное увеличение показателей кислотного числа жира, которые зависели от продолжительности и температурного параметра при хранении лабораторных проб муки. Образцы пшеничной муки, заложенные на хранение при температурах 20 °С, 30 °С и 40 °С, характеризовались наибольшей интенсивностью роста кислотного числа жира.

Результаты исследований влияния продолжительности хранения и температурного фактора на изменение показателя КЧЖ проб муки с использованием уравнения Аррениуса приведены в Таблице 4.

Таблица 4. Значения коэффициентов скорости изменения КЧЖ для проб муки от температуры

Table 4. Values of the coefficients of the rate of change in the AV of fat for flour samples depending on temperature

Температура хранения, °С	Значение показателей уравнения Аррениуса		
	1/T	k	ln(k)
Пробы пшеничной муки			
20	0,003413	0,1599	-1,8333
30	0,00330	0,1627	-1,8156
40	0,003195	0,2801	-1,2725
Пробы пшенично-кедровой муки			
20	0,003413	0,1468	-1,9188
30	0,0033	0,1330	-2,0149
40	0,003195	0,1000	-2,3026

Исходя из полученной информации, уравнение Аррениуса для лабораторной пробы пшеничной муки представлено в следующем виде:

$$\ln(k) = 6,7617 - 2,5440(1/T) = 6,7617 - 2,5440(1/293) = -1,6405. \quad (7)$$

Проведенные расчеты по формуле позволили определить прогнозируемый срок хранения пробы пшеничной муки по показателю КЧЖ, который составил 218 суток и 7,2 месяца.

Уравнение Аррениуса для композитной пшенично-кедровой муки представлено в виде:

$$\ln(k) = -7,8573 + 1,7496(1/293) = -2,0788. \quad (8)$$

Прогнозируемый срок хранения разработанного продукта по показателю КЧЖ составляет 276 суток, или 9,1 месяца.

Наличие растительного жира в составе композитной пшенично-кедровой муки (5,63 ± 0,15 %) гипотетически должно приводить к сокращению срока хранения разработанного продукта. Однако полученные экспериментальные данные изменения КЧЖ при хранении демонстрируют противоположную тенденцию. Полученные результаты, вероятно, связаны с несколькими факторами. Во-первых, значения показателя КЧЖ кедрового масла фактически составляют 0,49–1,72 мг КОН на 1 г жира [37], и, в соответствии с нормативными документами, не должны превышать 4,0 мг КОН на 1 г жира. Аналогичный показатель для пшеничной муки значительно выше, его фактические значения варьируются в диапазонах 12,5–20 мг КОН на 1 г жира [38], а в нормативной документации

срок хранения определен значением 50 мг КОН на 1 г жира²². Во-вторых, присутствие в составе композитной пшенично-кедровой муки позиционного изомера линоленовой кислоты — пиноленовой [39], источником которой являются измельченные совместно с зерном пшеницы ядра кедрового ореха, может влиять на стабильность липидов и замедлять окислительные процессы при хранении. В-третьих, инкапсуляция растительного масла кедрового ореха водонерастворимым глютенем и разрушенными зёрнами крахмала пшеничной муки [40] происходит самопроизвольно при реализации технологического процесса совместного помола при производстве композитной муки.

Для подтверждения прогнозируемого срока хранения исследуемых образцов осуществляли балльную оценку качества хлебобулочных изделий, приготовленных из проб пшеничной и пшенично-кедровой муки с периодичностью 30 суток на каждом этапе хранения в течение 180 дней. Результаты представлены на Рисунке 2.

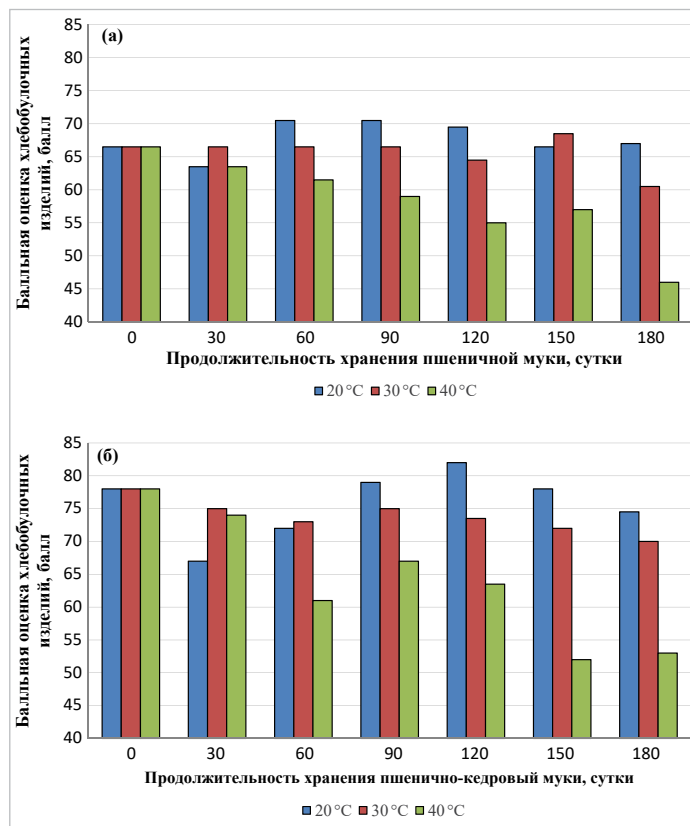


Рисунок 2. Диаграммы изменения балльной оценки качества хлебобулочных изделий из пшеничной (а) и пшенично-кедровой (б) муки при хранении

Figure 2. Diagrams showing changes in the quality score of bakery products made from wheat (a) and wheat-cedar (b) flours during storage

Следует отметить, что повышение балльной оценки качества хлебобулочных изделий, произведенных из муки, хранившейся при температуре 20 ± 0,5 °С, связан в первую очередь с повышением ее водопоглотительной способности и, как следствие, с увеличением формоустойчивости подовых изделий. Наблюдение за хлебопекарными свойствами проб муки, хранение которых происходило при температуре 30 ± 0,5 °С, показало снижение характеристик приготовленных из них изделий.

Математическая обработка данных с применением уравнения Аррениуса по показателям балльной оценки хлебобулочных изделий из пшеничной муки представлена в виде:

$$\ln(k) = 19,1802 - 6,8194(1/293) = -3,4168. \quad (9)$$

Расчетный показатель срока хранения составил 215 суток, или 7,1 месяца, что отличается от ранее полученных значений прогнозируемого срока хранения по КЧЖ на 1,4 %.

Для проб хлебобулочных изделий из композитной пшенично-кедровой муки уравнение получено в виде:

$$\ln(k) = 20,1942 - 7,0363(1/293) = -3,0448. \quad (10)$$

²² ГОСТ 26574-2017 «Мука пшеничная хлебопекарная». Москва: Стандартинформ, 2018–12 с.

Прогнозируемый показатель срока хранения равен 269 суткам, или 8,8 месяцам, что отличается от показателя срока хранения, прогнозируемого по кислотному числу, на 2,6%.

Таким образом, использование кедрового ореха в составе композитных мучных смесей не оказывало отрицательного влияния на показатель кислотного числа жира продукции, прогнозируемый срок хранения композитной пшенично-кедровой муки составил не менее 8 месяцев.

На следующем этапе проводили оценку антиоксидантных характеристик пшенично-кедровой муки и проб хлебобулочных изделий в сравнении с показателями изделий, приготовленных из муки пшеничной различных сортов. Антиоксидантную способность лабораторных проб муки оценивали спектрофотометрическим методом по отношению к катион-радикалу АБТС. Данный метод применяется в международной практике для сравнения и стандартизации растительных источников и пищевых добавок [41–43]. Установленные значения антиоксидантной емкости композитной пшенично-кедровой муки составили $0,32 \pm 0,03$ и $5,22 \pm 0,14$ мкмоль ТЭ/г с.в. для липофильной и гидрофильной фракций соответственно.

Полученные значения для хлебобулочных изделий приведены на Рисунке 3 и Рисунке 4.

Результаты сравнительной оценки антиоксидантных характеристик хлебобулочных изделий, выработанных из исследуемых проб муки, показали повышенные значения как для гидрофильной, так и для липофильной фракции мякиша изделий из композитной пшенично-кедровой муки. Обобщенной характеристикой антиоксидантных свойств хлебобулочных изделий является Prioq-критерий [44]. Его значение для изделий, полученных из композитной пшенично-кедровой муки, составило 0,26, что выше значения для изделий из цельнозерновой муки (0,10) и пшеничной муки 1-го сорта (0,07).

Окислительный стресс, определяемый как дисбаланс между продукцией активных форм кислорода (ROS) и антиоксидантной защитой, считается ключевой движущей силой, которая увеличивает восприимчивость к развитию возрастных патологий. В настоящее время многочисленные активаторы транскрипционного фактора NRF2, принадлежащие к различным химическим классам, находятся на разных стадиях обоснования и клинической разработки. К числу таких соединений относятся пищевые биологически активные вещества, включая куркумин, производные фумаровой кислоты, изотиацианат сульфорафан, ресвератрол и жирные кислоты [45].

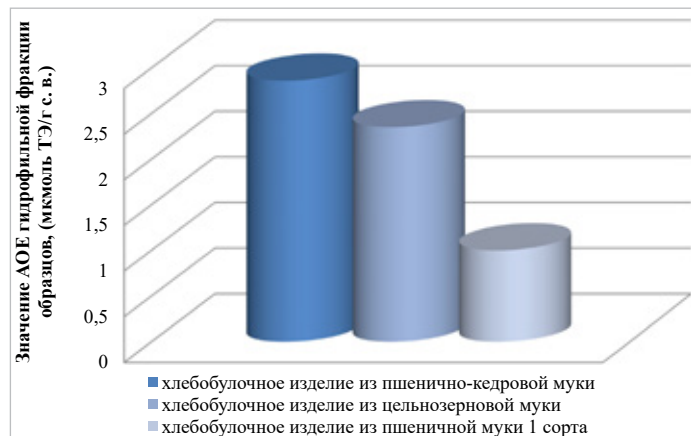


Рисунок 3. Антиоксидантная емкость гидрофильных фракций хлебобулочных изделий
Figure 3. Antioxidant capacity of hydrophilic fractions of bakery products

бобулочные изделия из пшенично-кедровой муки обладают антиоксидантными свойствами, обусловленными наличием биологически активных веществ в составе композитной муки. Гипотетически, именно благодаря их наличию и воздействию на липидные компоненты композитной муки процесс гидролиза жиров идет с меньшей скоростью, что можно наблюдать по динамике прироста показателя КЧЖ при хранении пшенично-кедровой муки.

4. Выводы

В результате проведенных исследований установлены хранимостепособность и антиоксидантные характеристики композитной пшенично-кедровой муки и хлебобулочных изделий, выработанных на ее основе.

Введение ядер кедрового ореха в помольную партию зерновой смеси в количестве 10% приводит к увеличению жира в 4,5 раза и белка на 9,6% в композитной пшенично-кедровой муке. При этом продукт обретает характерный кедровый аромат, что положительно влияет на органолептическую оценку продуктов.

Проведена сравнительная оценка показателей качества пшеничной и композитной пшенично-кедровой муки. Установлено, что внесение ядер кедрового ореха снижает показатели влажности, белизны, числа падения и содержания клейковины; также отмечено ее ослабление и увеличение растяжимости.

Выявлен характер изменения показателя КЧЖ пшеничной и пшенично-кедровой муки при хранении в течение 180 суток при температурах 20°C, 30°C и 40°C, что позволило спрогнозировать сроки хранения композитной пшенично-кедровой муки. Установлено, что применение ядер кедрового ореха в составе композитной пшенично-кедровой муки не повышает прирост показателя КЧЖ. Прогнозируемый срок хранения композитной пшенично-кедровой муки составил не менее 8 месяцев.

Установлены антиоксидантные характеристики композитной пшенично-кедровой муки: значения составили $0,32 \pm 0,03$ и $5,22 \pm 0,14$ мкмоль ТЭ/г с.в. для липофильной и гидрофильной фракций соответственно. Для проб хлебобулочных изделий, выработанных на ее основе, значение Prioq-критерия составило 0,26, что превышает аналогичные значения для пшеничных изделий из цельнозерновой муки (0,10) и из муки пшеничной хлебопекарной 1-го сорта (0,07).

Таким образом, композитная пшенично-кедровая мука может быть рекомендована для промышленного производства и выработки продукции повышенной пищевой ценности.

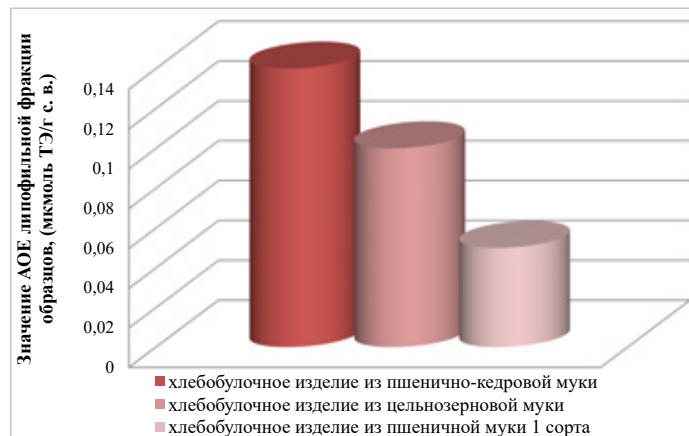


Рисунок 4. Антиоксидантная емкость липофильных фракций хлебобулочных изделий
Figure 4. Antioxidant capacity of lipophilic fractions of bakery products

Таким образом, проведенные исследования показали, что хле-

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Егорова, Е. Ю., Поздняковский, В. М. (2010). Пищевая ценность кедровых орехов Дальнего Востока. *Известия вузов. Пищевая технология*, 4(316), 21–24. [Egorova, E. Yu., Pozdnyakovskiy, V. M. (2010) Alimentary value of the Far East cedar nuts. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 4, 21–24. (In Russian)]
- Baker, E. J., Miles, E. A., Calder, P. C. (2021). A review of the functional effects of pine nut oil, pinolenic acid and its derivative eicosatrienoic acid and their potential health benefits. *Progress in Lipid Research*, 82, Article 101097. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2021.101097>
- Гагаро, М. А., Калашникова, С. П., Соловьев, В. Г., Никонова, Л. Г. (2023). Доступные пищевые источники полиненасыщенных жирных кислот в условиях северного региона. *Научный медицинский вестник Югры*, 37(3), 8–14. [Gagar, M. A., Kalashnikova, S. P., Solovyov, V. G., Nikonova, L. G. (2023). Available food sources of polyunsaturated fatty acids in the conditions of the northern region. *The Scientific and Practical Journal of Medicine*, 37(3), 8–14. (In Russian)] <https://doi.org/10.25017/2306-1367-2023-37-3-8-14>
- Wolff, R. L., Comps, B., Marpeau, A. N., Deluc, L. G. (1997). Taxonomy of pinus species based on the seed oil fatty acid compositions. *Trees*, 12(2), 113–118. <https://doi.org/10.1007/pl00009698>
- Takala, R., Ramji, D. P., Choy, E. (2023). The beneficial effects of pine nuts and its major fatty acid, pinolenic acid, on inflammation and metabolic perturbations in inflammatory disorders. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(2), Article 1171. <https://doi.org/10.3390/ijms24021171>

6. Takala, R., Ramji, D.P., Andrews, R., Zhou, Y., Farhat, M., Elmajee, M. et al. (2022). Pinolenic acid exhibits anti-inflammatory and anti-atherogenic effects in peripheral blood-derived monocytes from patients with rheumatoid arthritis. *Scientific Reports*, 12(1), Article 8807. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12763-8>
7. Chen, S.-Ju., Huang, W.-Ch., Shen, H.-J., Chen, R.-Y., Chang, H., Ho, Y.-S. et al. (2020). Investigation of modulatory effect of pinolenic acid (PNA) on inflammatory responses in human THP-1 macrophage-like cell and mouse models. *Inflammation*, 43(2), 518–531. <https://doi.org/10.1007/s10753-019-01134-7>
8. Посокина, Н. Е., Захарова, А. И. (2023). Современные нетермические способы обработки растительного сырья, применяемые для увеличения его хранимоспособности. *Пищевые системы*, 6(1), 4–10. [Posokina, N. E., Zakharova, A. I. (2023). Modern non-thermal methods of processing plant raw materials used to increase its storage capacity. *Food Systems*, 6(1), 4–10. (In Russian)] <https://doi.org/10.21523/2618-9771-2023-6-1-4-10>
9. Посокина, Н. Е., Захарова, А. И. (2024). Современные биологические способы обработки растительного сырья, применяемые для увеличения его хранимоспособности. *Пищевые системы*, 7(2), 298–304. [Posokina, N. E., Zakharova, A. I. (2024). Modern biological methods of processing plant raw materials used to increase its storage capacity. *Food Systems*, 7(2), 298–304. (In Russian)] <https://doi.org/10.21523/2618-9771-2024-7-2-298-304>
10. Захарова, А. С., Егорова, Е. Ю. (2021). Медовый мармелад с ядром кедровых орехов. *Ползуновский вестник*, 1, 20–26. [Zakharova, A. S., Egorova, E. Y. (2021). Honey marmalade with pine nut kernels. *Polzunovskiy Vestnik*, 20–26. (In Russian)] <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.003>
11. Владимцева, Т. М., Козина, Е. А. (2022). Изучение показателей качества и безопасности влияния кедрового полуфабриката на свойства полутвердого сыра. *Вестник КрасГАУ*, 5, 161–169. [Vladimtseva, T. M., Kozina, E. A. (2022). Studying quality and safety indicators of the cedar semifinished products effect on the semi-hard cheese properties. *Bulletin KrasSAU*, 5, 161–169. (In Russian)] <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-5-161-169>
12. Мазалевский, В. Б. (2023). Влияние компонентов рецептуры на технические характеристики кедрового напитка. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 3, 102–114. [Mazallevskiy, V. B. (2023). Influence of the recipe components on the technical characteristics of the pine nuts and oil cake beverages. *Storage and Processing of Farm Products*, 3, 102–114. (In Russian)] <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.419>
13. Туманова, А. Е., Типсина, Н. Н., Демиденко, Г. А., Струпан, Е. А., Сизых, О. А. (2024). Применение кедрового жмыха в производстве печенья. *Хлебопродукты*, 8, 49–53. [Tumanova, A. E., Tipsisina, N. N., Demidenko, G. A., Strupan, E. A., Sizykh, O. A. (2024). The use of cedar cake in the production of cookies. *Khelebroprodukt*, 8, 49–53. (In Russian)] <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2024-33-8-49-53>
14. Гончар, В. В., Шульвинская, И. В., Зайченко, Е. Ю. (2008). Использование кедровых орехов при производстве заварных пряничных изделий. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2–3(303–304), 52–54. [Gonchar, V. V., Shulvinskaya, I. V., Zaichenko, E. Y. (2008). The use of pine nuts in production of choux gingerbread confectionary. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3(303–304), 52–54. (In Russian)]
15. Росляков, Ю. Ф., Гончар, В. В., Шульвинская, И. В., Зайченко, Е. Ю. (2007). Применение ядра орехов кедровой сибирской сосны (*Pinus Sibirica*) в производстве мучных кондитерских изделий функционального назначения. *Фундаментальные исследования*, 7, 89–90. [Roslyakov, Yu. F., Gonchar, V. V., Shulvinskaya, I. V., Zaichenko, E. Y. (2007). The use of kernels of Siberian stone pine (*Pinus Sibirica*) nuts in production of functional flour confectionary. *Fundamental Research*, 7, 89–90. (In Russian)]
16. Лю, Я. (2016). Разработка рецептур и технологии хлеба с порошком из жмыха кедровых орехов. *Вестник КрасГАУ*, 2(113), 112–118. [Lu, Ya. (2016). The development of recipes and technology of bread with the cake pine nuts powder. *Bulletin of KSAU*, 2(113), 112–118. (In Russian)]
17. Acorsi, D. M., Bezerra, J. R. M. V., Barão, M. Z., Rigo, M. (2009). Viability of cookie-processing with Paraná pine nut flour. *Ambiência-Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, 5(2), 207–212. (In Portuguese)
18. Silva, S. P., Coreta-Gomes, F., Coimbra, M. A., Coelho, E. (2024). Pine nut skin as a source of phytosterols and alkanediols – Hypocholesterolemic potential and development of sustainable vegan emulsifiers. *LWT*, 197, Article 115934. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115934>
19. Davinelli, S., Medoro, A., Intrieri, M., Saso, L., Scapagnini, G., Kang, J. X. (2022). Targeting NRF2–KEAP1 axis by Omega-3 fatty acids and their derivatives: Emerging opportunities against aging and diseases. *Free Radical Biology and Medicine*, 195(Pt 2), 736–750. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2022.11.017>
20. Типсина, Н. Н., Толмачева, Т. А. (2022). Обеспечение контроля качества и пищевой безопасности орехоплодного сырья. *Вестник КрасГАУ*, 5(182), 249–256. [Tipsisina, N. N., Tolmacheva, T. A. (2022). Ensuring quality control and food security of nut-bearing raw materials. *Bulletin of KSAU*, 5(182), 249–256. (In Russian)] <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-5-249-256>
21. Silva, E. F. R., da Silva Santos, B. R., Minho, L. A. C., Brandão, G. C., de Jesus Silva, M., Silva, M. V. L. et al. (2022). Characterization of the chemical composition (mineral, lead and centesimal) in pine nut (*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze) using exploratory data analysis. *Food Chemistry*, 369, Article 130672. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130672>
22. Moschetti, R., Berhe, D. H., Agrimi, M., Haff, R. P., Liang, P., Ferri, S. et al. (2021). Pine nut species recognition using NIR spectroscopy and image analysis. *Journal of Food Engineering*, 292, Article 110357. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110357>
23. Витол, И. С., Мелешкина, Е. П. (2024). Композитные виды муки. Часть 2. Обогащение пшеничной муки нетрадиционными видами растительного сырья (обзор). *Пищевая промышленность*, 5, 39–43. [Vitol, I. S., Meleshkina, E. P. (2024). Composite flours. Part 2. Enrichment of wheat flour with cereals, legumes and oilseeds (review). *Food Industry*, 5, 39–43. (In Russian)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.5.5.011>
24. Витол, И. С., Мелешкина, Е. П. (2024). Композитные виды муки. Часть 3. Мука, полученная при совместном размоле зерносмесей, и мучные (хлебопекарные) смеси из отдельных видов муки (обзор). *Пищевая промышленность*, 6, 76–83. [Vitol, I. S., Meleshkina, E. P. (2024). Composite flours. Part 3. Flour obtained by joint grinding of mixtures and flour (baking) mixtures from individual types of flour (review). *Food Industry*, 6, 76–83. (In Russian)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.6.6.016>
25. Самчук, Т. В., Осипчук, И. Р., Кечкин, И. А., Белявская, И. Г. (2022). Совершенствование технологии хлебобулочных изделий путем применения пшенично-ореховой муки на основе кедрового ореха. *Хлебопродукты*, 8, 32–35. [Samchuk, T. V., Osipchuk, I. R., Kechkin, I. A., Belyavskaya, I. G. (2022). Improving the technology of bakery products by using wheat-nut flour based on pine nuts. *Khelebroprodukt*, 8, 32–35. (In Russian)] <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2022-31-8-32-35>
26. Щетинин, М. П., Фролова, А. Е. (2021). Исследование показателей качества кондитерской пасты с мукой подсолнечной. *Вопросы питания*, 90(3(535)), 116–124. [Shchetinin, M. P., Frolova, A. E. (2021). Research of quality indicators of confectionery paste with sunflower flour. *Problems of Nutrition*, 90(3(535)), 116–124. (In Russian)] <https://doi.org/10.33029/0042-8835-2021-90-3-116-124>
27. Сорочинский, В. Ф., Приезжева, Л. Г. (2017). Математическая модель прогнозирования сроков безопасного хранения и годности пшеничной хлебопекарной муки. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 12, 24–27. [Sorochinsky, V. F., Priezzheva, L. G. (2017). A mathematical model to predict the timing of safe storage and shelf life of wheat bread flour. *Storage and Processing of Farm Products*, 12, 24–27. (In Russian)]
28. Панкратов, Г. Н., Мелешкина, Е. П., Витол, И. С., Коломиец, С. Н., Кечкин, И. А. (2021). Пшенично-льняная мука: условия получения и возможности хранения. *Пищевая промышленность*, 2, 55–59. [Pankratov, G. N., Meleshkina, E. P., Vitol, I. S., Kolomiets, S. N., Kechkin, I. A. (2021). Wheat-flaxseed flour: The conditions for obtaining and storage capability. *Food Industry*, 2, 55–59. (In Russian)] <https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-2-0019>
29. Яциких, А. В., Ванина, Л. В., Цыгаркина, А. С. (2024). Методы определения кислотного числа жира зерна и продуктов его переработки. *Хлебопечение России*, 68(1), 34–44. [Yaitskikh, A. V., Vanina, L. V., Tsygarkina, A. S. (2024). Methods for determining the acid number of grain fat and its processing products. *Bakery of Russia*, 68(1), 34–44. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-2-298-304>
30. Осипчук, И. Р., Всемиров, А. С., Белявская, И. Г., Дубцова, Г. Н. (6 июня, 2023) *Изучение технологических свойств пшенично-кедровой муки*. Сборник материалов V международной научно-практической молодежной конференции, посвященной памяти Р. Д. Поландовой. Пищевые технологии будущего: инновационные идеи, научный поиск, креативные решения. Москва, Россия. Белый Берег, 2023. [Osipchuk, I. P., Vsemirnov, A. S., Belyavskaya, I. G., Dubtsova, G. N. (June 6, 2023). *Researching of the technological properties for wheat and cedar flour*. Proceedings of the 5th International Scientific-practical youth conference dedicated to the memory of R. D. Polandova. Food technologies of the future: Innovative ideas, scientific search, creative solutions. Moscow, Russia. Bely Veter, 2023. (In Russian)]
31. Дубцова, Г. Н., Максимов, А. С., Пономарева, С. М., Протункевич, И. В., Колмыков, Д. М. (2024). Метод ускоренного тестирования срока годности пищевых концентратов. *Пищевая промышленность*, 12, 110–115. [Dubtsova, G. N., Maksimov, A. S., Ponomareva, S. M., Protunkevich, I. V., Kolmykov, D. M. (2024). Method of accelerated testing of shelf life of food concentrates. *Food Industry*, 12, 110–115. (In Russian)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.12.12.022>
32. Loewe-Muñoz, V., Noel, D. (2021). Mediterranean *Pinus pinea* L. nuts from Southern Hemisphere provenances. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 32, 181–189. <https://doi.org/10.1007/s12210-021-00980-8>
33. Georgopoulos, T., Larsson, H., Eliasson, A.-C. (2006). Influence of native lipids on the rheological properties of wheat flour dough and gluten. *Journal of Texture Studies*, 37(1), 49–62. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2006.00038.x>
34. Rocca-Smith, J. R., Marcuzzo, E., Karbowiak, T., Centa, J., Giacometti, M., Scapin, F. et al. (2016). Effect of lipid incorporation on functional properties of wheat gluten based edible films. *Journal of Cereal Science*, 69, 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.04.001>
35. Adelina, N. M., An, J., Guo, Q., Zhang, L., Zhao, Y. (2024). Physicochemical quality and conditions. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(4), 2878–2893. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02365-5>
36. Субботина, М. А., Лобова, Т. В., Долголюк, И. В. (2016). Исследование процесса послеуборочного дозревания семян сосны кедровой сибирской. *Техника и технология пищевых производств*, 42(3), 84–87. [Subbotina, M. A., Lobova, T. V., Dolgolyuk, I. V. (2016). Study on post-harvest ripening of pinons of Siberian stone pine. *Food Processing: Techniques and Technology*, 42(3), 84–87. (In Russian)]
37. Байтукалов, Т. А., Богословская, О. А., Глушенко, Н. Н., Орехова, О. И., Ольховская, И. П. (2004). Физико-химические показатели кедрового и льняного масел и создание лекарственных форм на их основе. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина*, 4, 253–256. [Baytukalov T. A., Bogoslovskaya O. A., Glushchenko N. N., Orekhova O. I., Olhovskaya I. P. (2004). Physico-chemical characteristics of cedar pine and flax oils and new medicinal form with them. *RUDN Journal of Medicine*, 4, 253–256. (In Russian)]
38. Приезжева, Л. Г., Сорочинский, В. Ф., Мелешкина, Е. П. (20–21 марта, 2015). *Кислотное число жира — показатель безопасного хранения и реализации зернопродуктов*. Труды XII Международной научно-практической конференции Пища. Экология. Качество, Москва, Россия. [Priezzheva, L. G., Sorochinsky, V. F., Meleshkina, E. P. (March 20–21, 2015). *Acid value of fat — an indicator of safe storage and sale of cereal products*. Proceedings of the 12th International scientific practical conference “Food. Ecology. Quality”. Moscow, Russia. (In Russian)]
39. Matsuo, N., Osada, K., Kodama, T., Lim, B. O., Nakao, A., Yamada, K. et al. (1996). Effects of γ -linolenic acid and its positional isomer pinolenic acid on immune parameters of Brown-Norway rats. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 55(4), 223–229.
40. Geranpour, M., Assadpour, E., Jafari, S. M. (2020). Recent advances in the spray drying encapsulation of essential fatty acids and functional oils. *Trends in Food Science and Technology*, 102, 71–90. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.028>
41. Prior, R. L., Cao, G., Prior, R. L., Cao, G. (2000). Analysis of botanicals and dietary

- supplements for antioxidant capacity: A review. *Journal of AOAC International*, 83(4), 950–956.
42. Jimenez-Alvarez, D., Giuffrida, F., Vanrobaeys, F., Golay, P. A., Cotting, C., Lardeau, A. et al. (2008). High-throughput methods to assess lipophilic and hydrophilic antioxidant capacity of food extracts in vitro. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(10), 3470–3477. <https://doi.org/10.1021/jf703723s>
43. Wu, X., Beecher, G. R., Holden, J. M., Haytowitz, D. B., Gebhardt, S. E., Prior, R. L. (2004). Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(12), 4026–4037. <https://doi.org/10.1021/jf049696w>
44. Белявская, И. Г. (2018). Антиоксидантные свойства хлебобулочных изделий из пшеничной муки с использованием нетрадиционных видов сырья. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 3, 8–19. [Belyavskaya, I. G. (2018). Antioxidant properties of bakery products from wheat flour using non-traditional raw materials. *Storage and Processing of Farm Products*, 3, 8–19. (In Russian)]
45. Haouet, M. N., Tommasino, M., Mercuri, M. L., Benedetti, F., Di Bella, S., Framboas, M. et al. (2019). Experimental accelerated shelf life determination of a ready-to-eat processed food. *Italian Journal of Food Safety*, 7(4), Article 6919. <https://doi.org/10.4081/ijfs.2018.6919>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Белявская Ирина Георгиевна — доктор технических наук, доцент, профессор, кафедра зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий, Российский биотехнологический университет 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 E-mail: belyavskaya@mgupp.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1924-2985 * автор для контактов</p> <p>Дубцова Галина Николаевна — доктор технических наук, профессор, кафедра «Биотехнология и биоорганический синтез», Российский биотехнологический университет 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 E-mail: doubtsova@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6520-394X</p> <p>Осипчук Иван Романович — аспирант, кафедра зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий, Российский биотехнологический университет 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 E-mail: osipchuk22@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6281-618X</p>	<p>Irina G. Belyavskaya, Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor, Department of Grains, Bakery and Confectionery Technologies, Russian Biotechnological University 11, Volokolamskoe shosse, 125080, Moscow, Russia E-mail: belyavskaya@mgupp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1924-2985 * corresponding author</p> <p>Galina N. Dubtsova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Biotechnology and Bioorganic Synthesis, Russian Biotechnological University 11, Volokolamskoe shosse, 125080, Moscow, Russia E-mail: doubtsova@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6520-394X</p> <p>Ivan R. Osipchuk, Graduate Student, Department of Grains, Bakery and Confectionery Technologies, Russian Biotechnological University 11, Volokolamskoe shosse, 125080, Moscow, Russia E-mail: osipchuk22@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6281-618X</p>
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-62-77>



Received 10.09.2025

Accepted in revised 05.03.2026

Accepted for publication 10.03.2026

© Pratama B. P., Khairullah A. R., Ma'ruf I.F., Kurniasih D. A.A., Sukmanadi M., Mustofa I., Akintunde A. O., Ahmad R. Z., Proboningrat A., Wardhani B. W.K., Yuri A. J.B., Leliana L., Ansori A. N.M., Utomo D. L.H., Nikmah A. K., Yulianti W., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

MYRICETIN AS A THERAPEUTIC AGENT: MOLECULAR RESEARCHES AND CLINICAL POTENTIAL

Bima P. Pratama¹, Aswin R. Khairullah², Ilma F. Ma'ruf³, Dea A. A. Kurniasih⁴, Mohammad Sukmanadi^{5*}, Imam Mustofa⁶, Adeyinka O. Akintunde⁷, Riza Z. Ahmad², Annise Proboningrat⁸, Bantari W. K. Wardhani³, Angel J. B. Yuri⁹, Lulum Leliana^{10*}, Arif N. M. Ansori^{11,12,13}, Desi L. H. Utomo⁹, Anggun K. Nikmah¹⁴, Wita Yulianti¹⁵

¹ Research Center for Process Technology, National Research and Innovation Agency (BRIN), Banten, South Tangerang, Indonesia

² Research Center for Veterinary Science, National Research and Innovation Agency (BRIN), Bogor, West Java, Indonesia

³ Research Center for Pharmaceutical Ingredients and Traditional Medicine, National Research and Innovation Agency (BRIN), Bogor, West Java, Indonesia

⁴ Research Center for Public Health and Nutrition, National Research and Innovation Agency (BRIN), Bogor, West Java, Indonesia

⁵ Division of Basic Veterinary Medicine, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga, Surabaya, East Java, Indonesia

⁶ Division of Veterinary Reproduction, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga, Surabaya, East Java, Indonesia

⁷ Department of Agriculture and Industrial Technology, Babcock University, Ilishan Remo, Ogun, Nigeria

⁸ Division of Veterinary Pathology, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga, Surabaya, East Java, Indonesia

⁹ Profession Program of Veterinary Medicine, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga, Surabaya, East Java, Indonesia

¹⁰ Department of Food and Agricultural Product Technology, Faculty of Agricultural Technology, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

¹¹ Postgraduate School, Universitas Airlangga, Surabaya, East Java, Indonesia

¹² Uttaranchal Institute of Pharmaceutical Sciences, Uttaranchal University, Uttarakhand, India

¹³ Medical Biotechnology Research Group, Virtual Research Center for Bioinformatics and Biotechnology, Surabaya, East Java, Indonesia

¹⁴ Aquaculture Study Program, Faculty of Fisheries and Marine, Universitas Airlangga, Surabaya, East Java, Indonesia

¹⁵ Research Center for Biota Systems, National Research and Innovation Agency (BRIN), Bogor, West Java, Indonesia

KEYWORDS:

Myricetin, flavonoid, plant, medicine, human health

ABSTRACT

Myricetin is a polyphenolic flavonol that is commonly present in tea, grapes, fruits, vegetables, and a number of medicinal plants. It is known to have a number of biological actions that are important for human health. Myricetin stands out for its multifunctional potential in the prevention and treatment of different infectious and degenerative disorders, especially as interest in natural bioactive chemicals grows. The primary mechanism entails robust antioxidant action by scavenging reactive oxygen species (ROS) and inducing the endogenous enzymes like catalase and superoxide dismutase. Furthermore, myricetin has anti-inflammatory properties via inhibiting the activation of the MAPK (mitogen-activated protein kinase) and NF-κB (nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells) pathways, which lowers the synthesis of pro-inflammatory cytokines. Numerous *in vitro* and *in vivo* investigations have demonstrated its capacity to suppress the growth of cancer cells, trigger apoptosis, and stop metastasis in the context of oncology. Myricetin decreases cholesterol, promotes endothelial function, and guards against atherosclerosis in the cardiovascular system. Its neuroprotective benefits are also encouraging, especially in terms of protecting dopamine in Parkinson's disease and preventing β-amyloid buildup in Alzheimer's disease. Furthermore, myricetin is important for preventing diabetes and obesity because it regulates blood glucose, improves insulin sensitivity, and modifies lipid metabolism. Antimicrobial and antiviral activities have also been documented, although they are still limited to experimental studies. Nevertheless, two significant obstacles to its conversion to practical applications are the lack of extensive clinical trials and the limited oral bioavailability. Future studies will concentrate on developing novel formulations, investigating safe and efficient dosages, and conducting thorough clinical trials. All things considered, myricetin shows significant promise as a multipurpose natural therapeutic candidate that promotes human health.

FUNDING: This work was supported by the National Research and Innovation Agency (BRIN) and the Indonesia Endowment Fund for Education (LPDP) through the RIIM Program — Competitive Wave 7 (Decree No. 61/II.7/HK/2024). The funding body had no role in the design of the study, the collection, analysis or interpretation of data, or in writing of the manuscript.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors would like to express their sincere gratitude to the National Research and Innovation Agency (BRIN) and the Indonesia Endowment Fund for Education (LPDP) for financial support through the Research and Innovation for Advanced Indonesia (RIIM) Program — Competitive Wave 7, as stipulated in the Decree of the Deputy for Research and Innovation Facilitation of BRIN No. 61/II.7/HK/2024. The authors also acknowledge material and immaterial support from the Research Organization for Agriculture and Food (ORPP BRIN) and the valuable assistance of the Research Center for Mineral Technology, BRIN, in the preparation and completion of this manuscript. Collaborative contributions from Institut Teknologi Sumatera (ITERA) are gratefully appreciated.

FOR CITATION: Pratama, B. P., Khairullah, A. R., Ma'ruf, I.F., Kurniasih, D. A. A., Sukmanadi, M., Mustofa, I. et al. (2026). Myricetin as a therapeutic agent: Molecular researches and clinical potential. *Food Systems*, 9(1), 62–77. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-62-77>

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пратама. Б. П., Хайрулла. А. Р., Маруф И. Ф., Курниаси Д. А. А., Сукманеди М., Мустофа И. и др. (2026). Мирицетин как терапевтическое средство: молекулярные исследования и потенциал клинического применения. *Пищевые системы*, 9(1), 62–77. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-62-77>

Поступила 10.09.2025

Поступила после рецензирования 05.03.2026

Принята в печать 10.03.2026

© Пратама Б. П., Хайрулла А. Р., Маруф И. Ф., Курниаси Д. А. А., Сукманади М., Мустофа И., Акинтунде А. О., Ахмад Р. З., Пробонинграт А., Вардхани Б. В. К., Юрий А. Дж. Б., Лелиана Л., Анзори А. Н. М., Утомо Д. Л. Х., Никма А. К., Юлианти В., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>Обзорная статья
Открытый доступ

МИРИЦЕТИН КАК ТЕРАПЕВТИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО: МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОТЕНЦИАЛ КЛИНИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Бима П. Пратама¹, Асвин Р. Хайрулла², Ильма Ф. Маруф³, Деа А. А. Курниасих⁴, Мохаммад Сукманади^{5*}, Имам Мустофа⁶, Адейинка О. Акинтунде⁷, Риза З. Ахмад², Аннис Пробинграт⁸, Бантари В. К. Вардхани³, Анхель Дж. Б. Юри⁹, Лулум Лелиана^{10*}, Ариф Н. М. Анзори^{11,12,13}, Дези Л. Х. Утомо⁹, Анггун К. Никма¹⁴, Вита Юлианти¹⁵

¹ Научно-исследовательский центр технологических процессов, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Бантен, Южный Тангеранг, Индонезия

² Научно-исследовательский центр ветеринарных наук, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Богор, Западная Ява, Индонезия

³ Исследовательский центр фармацевтических ингредиентов и традиционной медицины, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Богор, Западная Ява, Индонезия

⁴ Исследовательский центр общественного здравоохранения и питания, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Богор, Западная Ява, Индонезия

⁵ Отдел фундаментальной ветеринарной медицины, факультет ветеринарной медицины, Университет Эйрлангга, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия

⁶ Отдел ветеринарной репродукции, факультет ветеринарной медицины, Университет Эйрлангга, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия

⁷ Кафедра сельского хозяйства и промышленных технологий, Университет Бэбкока, Илишан Ремо, Огун, Нигерия

⁸ Отделение ветеринарной патологии, факультет ветеринарной медицины, Университет Эйрлангга, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия

⁹ Профессиональная программа ветеринарной медицины, факультет ветеринарной медицины, Университет Эйрлангга, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия

¹⁰ Кафедра технологии пищевых продуктов и сельскохозяйственной продукции, факультет сельскохозяйственных технологий, Университет Гаджа Мада, Джакарта, Индонезия

¹¹ Департамент аспирантуры, Университет Эйрлангга, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия

¹² Институт фармацевтических наук Уттаранчала, Университет Уттаранчала, Уттаранчал, Индия

¹³ Исследовательская группа медицинской биотехнологии, Виртуальный исследовательский центр биоинформатики и биотехнологии, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия

¹⁴ Программа обучения аквакультуре, факультет рыболовства и морского хозяйства, Университет Эйрлангга, Кампус С. Мульорехо, Сурабая, Восточная Ява, Индонезия

¹⁵ Исследовательский центр биотных систем, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN), Богор, Западная Ява, Индонезия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

Мирицетин, флавоноид, растение, лекарство, здоровье человека

Мирицетин — полифенольный флавонол, широко распространенный в чае, винограде, фруктах, овощах и ряде лекарственных растений. Известно, что он обладает рядом биологических свойств, важных для здоровья человека. Мирицетин выделяется своим многофункциональным потенциалом в профилактике и лечении различных инфекционных и дегенеративных заболеваний, особенно в связи с ростом интереса к природным биоактивным веществам. Основной механизм его действия заключается в мощном антиоксидантном действии, которое выражается в нейтрализации активных форм кислорода (АФК) и индукции таких эндогенных ферментов, как каталаза и супероксиддисмутаза. Кроме того, мирицетин обладает противовоспалительными свойствами, ингибируя активацию сигнальных путей MAPK и NF-κB, что снижает синтез провоспалительных цитокинов. Многочисленные исследования *in vitro* и *in vivo* продемонстрировали его способность подавлять рост раковых клеток, запускать апоптоз и останавливать метастазирование в онкологии. Мирицетин снижает уровень холестерина, способствует улучшению функции эндотелия и защищает сердечно-сосудистую систему от атеросклероза. Его нейропротекторные свойства также весьма обещающие, особенно в плане защиты дофамина при болезни Паркинсона и предотвращения накопления β-амилоида при болезни Альцгеймера. Кроме того, мирицетин важен для профилактики диабета и ожирения, поскольку он регулирует уровень глюкозы в крови, улучшает чувствительность к инсулину и меняет липидный обмен. Также были зарегистрированы его антимикробные и противовирусные свойства, хотя они пока ограничены экспериментальными исследованиями. Тем не менее, двумя существенными препятствиями для практического применения являются отсутствие обширных клинических испытаний и ограниченная биодоступность при пероральном приеме. Будущие исследования будут сосредоточены на разработке новых формул, изучении безопасных и эффективных дозировок и проведении тщательных клинических испытаний. Учитывая всё это, мирицетин имеет возможность стать многоцелевым природным терапевтическим веществом, улучшающим здоровье человека.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная работа была поддержана Национальным агентством исследований и инноваций (BRIN) и Индонезийским фондом развития образования (LPDP) в рамках программы RIIM — Конкурсная волна 7 (Указ № 61/II.7/НК/2024). Финансирующая организация не принимала участия в разработке исследования, сборе, анализе или интерпретации данных, а также в написании данной статьи.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают искреннюю благодарность Национальному агентству исследований и инноваций (BRIN) и Индонезийскому фонду развития образования (LPDP) за финансовую поддержку в рамках Программы исследований и инноваций для передовой Индонезии (RIIM) — Конкурсная волна 7, предусмотренной Постановлением заместителя по научным исследованиям и содействию инновациям BRIN № 61/II.7/НК/2024. Авторы также выражают благодарность Научно-исследовательской организации сельского хозяйства и продовольствия (ORPP BRIN) за материальную и нематериальную поддержку, и Научно-исследовательскому центру минеральных технологий, BRIN за ценную помощь в подготовке и выполнении данной авторской работы. Мы выражаем благодарность Институту технологий Суматры (ITERA) за совместную работу.

1. Introduction

Flavonoids are a group of secondary plant metabolites that have an important role in maintaining human health [1]. This compound, which may be found in a wide variety of fruits, vegetables, tea, wine, and spices, has long been acknowledged for its anti-inflammatory, anti-cancer, and antioxidant biological benefits [2]. Flavonoids have garnered significant interest in the domains of pharmacology and nutraceuticals in recent decades due to their potential as preventive measures and supplementary treatments for a range of degenerative illnesses [3]. Myricetin is a significant member of the flavonol group and one of the flavonoids with the strongest antioxidant potential due to its polyhydroxy chemical structure and six hydroxyl groups [4].

Myricetin is found abundantly in berries, onions, spinach, green tea, and red wine [5]. Its inclusion into common dietary items suggests that people consume this compound in quite large quantities, so making research on its impact on health extremely pertinent [6]. Numerous studies have demonstrated that myricetin possesses a wider range of bioactivity than other flavonols, including anticancer properties and defense against the diseases of neurological, metabolic, and cardiovascular systems [7–10]. This function is strongly linked to its capacity to control cellular signaling pathways, neutralize free radicals, and alter the expression of genes linked to inflammation and oxidative stress [11].

An important reason why myricetin deserves special attention is because of its pleiotropic properties, namely its ability to influence many molecular targets simultaneously [12]. This compound operates as a regulator of signaling pathways that control immunological responses, apoptosis, and cell proliferation in addition to acting as a direct antioxidant by absorbing reactive oxygen species (ROS) [13]. Therefore, myricetin holds significant promise for preventing multifactorial chronic diseases like cancer, Alzheimer's, type 2 diabetes, and atherosclerosis [14–17]. A reassessment of myricetin's potential in the health industry is also urgently needed, given the global trend towards a healthier lifestyle and the growing interest in functional foods and supplements made from natural ingredients [18].

Although much research has been done on flavonoids, comprehensive studies specifically on myricetin are relatively limited. The majority of the data that are currently available are still incomplete, concentrating primarily on specific elements, such as antioxidant or anticancer activities, without thoroughly connecting the molecular pathways to the potential therapeutic advantages attained [19]. However, there is still a shortage of clinical evidence in humans, and the majority of the data that is now accessible comes from *in vitro* and animal research [5]. This leads to a knowledge gap that must be filled by critical research in order to shift future research's focus more toward practical applications.

The limited bioavailability of myricetin is another significant obstacle to its use [20]. This compound is easily broken down in the liver and intestines, thus resulting in a comparatively low active concentration entering the bloodstream [4]. These elements bring up significant issues with relation to safe long-term use, ideal composition, and appropriate dosage. Examining the biological elements and health advantages is therefore important, but so is looking at the technical challenges and opportunities for its development as a medicinal agent or nutraceutical.

Based on this background, this review was prepared with the aim of summarizing the current scientific evidence regarding myricetin in the context of human health. The focus of discussion includes natural sources and bioavailability, key biological mechanisms, and documented health effects, ranging from cardiovascular, metabolic, and neuroprotective protection to anticancer and antimicrobial activities. This article also focuses on

future development directions, research issues, and security aspects. Thus, there is hope that this review can provide a comprehensive overview of the potential of myricetin as a promising candidate bioactive agent, while also highlighting research gaps that still need to be addressed.

2. Data collection method

This review synthesized evidence identified through systematic searches of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar covering publications through August 2025. Search strings combined controlled terms and free text (e.g., *myricetin* AND *flavonol* AND (*antioxidant* OR *anti-inflammatory* OR *anticancer* OR *neuroprotective* OR *cardioprotective* OR *antimicrobial* OR *bioavailability* OR *nanodelivery* OR *clinical*)), with Boolean operators and citation tracking (snowballing) from key papers. Eligible records were peer-reviewed articles in English, including *in vitro* and *in vivo* studies, clinical investigations, and critical reviews directly addressing myricetin's sources, chemistry, pharmacology, molecular mechanisms (e.g., NF- κ B, Nrf2, MAPK, PI3K/AKT, AMPK), epigenetic regulation, safety/toxicity, drug–interaction potential, bioavailability, and formulation strategies. Exclusions consisted of conference abstracts, non-English works without reliable translation, editorials, non-peer-reviewed items, and studies lacking methodological clarity or having no direct relevance. After deduplication, titles/abstracts were screened followed by full-text assessment using predefined criteria; data were extracted on study design, model/system, exposure/dose/formulation, outcomes, and mechanistic readouts, and then narratively integrated across disciplines (biochemistry, pharmacology, nutraceuticals, and clinical sciences) to produce an updated, critical appraisal compliant with best practices for scoping reviews.

3. Sources and bioavailability of myricetin

To understand the health potential of myricetin, it is important to first review the basic aspects including its natural sources in food, its chemical structure characteristics and physicochemical properties, its bioavailability profile including digestion, absorption, metabolism, distribution, and elimination, and various factors that influence its stability and bioavailability.

3.1. Natural sources of myricetin

Myricetin is a polyhydroxy flavonol found widely in various plant foods [21]. It is typically found in the human diet from the ingestion of tea, wine, fruits, vegetables, and a number of herbal plants [5]. Myricetin is one of the significant flavonoids that frequently enters the body through daily meals because of its broad distribution [22]. Table 1 summarizes various natural sources of myricetin, ranging from fruits, vegetables, tea, wine, to herbal plants.

One of the primary sources of myricetin is fruit [4]. High levels of this compound are found in many berries, such as blueberries, cranberries, blackberries, and bilberries [23]. The high antioxidant content of berries has earned them the moniker “superfood,” and myricetin is a key component in supplying these health benefits [24]. Furthermore, myricetin is available in considerable amounts in grapes, particularly red grapes [25]. Because of this, its fermented product, red wine, is frequently linked to cardioprotective advantages through the “French paradox” [26].

Myricetin has also been found in kiwis, oranges, pomegranates, and apples [27]. Similar to how other polyphenols are distributed, this compound is more prevalent in the skin of apples than in the meat [28]. This demonstrates how crucial it is to eat the entire fruit in order to maximize its bioactive effects.

Table 1. Natural sources and characteristics of myricetin content

Таблица 1. Природные источники и характеристики уровней содержания миррицетина

Category	Example source	Content/Distribution	Relevance description	References
Fruits	Blueberries, cranberries, blackberries, bilberries, red grapes, apples, pomegranates, oranges, and kiwis	High in fruit skin and red grapes are rich in flavonols	Acting as a major source of antioxidants and consuming whole fruit increases myricetin intake	[23–28]
Vegetables	Onions, tomatoes, spinach, broccoli, and cabbage	The content variation and red onions are relatively high	Supports antimicrobial properties and is protective against degenerative diseases	[29–31]
Tea	Green tea (<i>Camellia sinensis</i>) and black tea	High in green tea and lower in black tea due to fermentation	Regular consumption is associated with cardiovascular, antidiabetic, and anticancer protection	[32–35]
Wine and products	Red grapes (<i>Vitis vinifera</i>) and red wine	High concentration on the skin and increased through fermentation	It has been linked to the “French paradox” and heart protection, although the specific contribution of myricetin remains to be investigated	[36–38]
Herbal plants	<i>Myrica rubra</i> (bayberry), <i>Rhus verniciflua</i> , and <i>Ampelopsis</i> spp.	High concentration and the basis of traditional medicine	Provides anti-inflammatory, hepatoprotective, and immunomodulatory effects	[39–44]

In addition to fruit, myricetin can be found naturally in a variety of vegetables [5]. The flavonol content of red onions, which includes myricetin and quercetin, has been extensively researched in relation to its antibacterial and anti-inflammatory qualities [29]. Moderate levels of myricetin, which is frequently linked to a preventive effect against degenerative disorders, are also found in spinach and tomatoes [30]. According to reports, broccoli and cabbage, which belong to the *Brassicaceae* family, feature lesser levels of these flavonols but nevertheless contribute to daily consumption when frequently ingested [31].

One of the main sources of polyphenols consumed worldwide is tea, and green tea (*Camellia sinensis*) contains a notable quantity of myricetin [32]. The myricetin content in tea varies depending on the type, processing method, and brewing time [33]. Green tea tends to contain higher flavonols than black tea, because the fermentation process in black tea causes the degradation of some of the polyphenol compounds [34]. Myricetin is thought to be one of the primary bioactive components of green tea, which has been associated with a lower risk of diabetes, cardiovascular disease, and several types of cancer [35].

Red wine, which is made from fermented red grapes (*Vitis vinifera*), is a significant source of myricetin [36]. Red wine has a relatively high concentration of flavonols because the fermenting process uses the grape skin, which has a higher flavonoid content than the fruit's flesh [37]. Red wine consumption in moderation has been linked to heart and blood vessel protection, while further research is still needed to determine the precise role of myricetin [38].

There are also other traditional medicinal plants that are said to be high in myricetin [13]. One well-known example is the bayberry (*Myrica rubra*), which is also the compound's source of name and is utilized in East Asian traditional medicine [39]. High levels of myricetin have also been found in plants like tea (*Camellia sinensis*), *Rhus verniciflua*, and a number of *Ampelopsis* species [4]. In addition to these sources, myricetin is also present in several species of the genus *Syzygium*. For instance, a myricetin derivative-rich fraction from *Syzygium malaccense* leaves, particularly containing myricitrin, has been reported to account for approximately 48.48% of the total flavonoid content based on HPLC analysis [40]. Moreover, *Syzygium polyanthum*, a widely used culinary and medicinal plant in Southeast Asia, has also been found as a natural source of myricetin, further supporting the nutritional and pharmacological importance of this genus [41–44]. These compounds are thought to support the herb's anti-inflammatory, hepatoprotective, and immunomodulatory properties, among other therapeutic benefits, in traditional medical practices [11,43].

It should be mentioned that a number of factors, including plant variety, growth conditions, harvesting techniques, and storage, affect the amount of myricetin in food [6]. For instance, it has been noted that berries cultivated in conditions with high light intensity featured higher flavonoid contents [45]. Myricetin levels are also impacted by processing; for instance, prolonged heating may degrade it, but some fermentations may actually make it more bioavailable [46].

Myricetin is found in many fruits, vegetables, tea, wine, and herbs, thus it can be naturally incorporated into a regular diet [47]. Consuming foods high in flavonoids, such as myricetin, has been linked in epidemiological studies to a lower chance of developing chronic illnesses like cancer, diabetes mellitus, and atherosclerosis [48]. Consequently, adding natural myricetin sources to the diet is one possible nutrition-based disease preventive tactics [49].

3.2. Chemical structure and physicochemical properties of myricetin

Myricetin belongs to the flavonoid subgroup and is a polyphenol component of the flavonol group [4]. This compound has the molecular formula $C_{15}H_{10}O_8$ with a molecular mass of approximately 318.24 g/mol [12]. The basic structure is a C6–C3–C6 flavonoid skeleton, which is composed of two aromatic rings (A and B) connected by an oxygenated heterocyclic ring (ring C) [1]. Myricetin differs from other flavonols, such as quercetin or kaempferol, in that it has six hydroxyl groups (–OH) at positions C-3, C-5, C-7, C-3', C-4', and C-5' [50]. Myricetin is a flavonoid with a very strong antioxidant capacity because of its extensive dispersion of hydroxyl groups [51].

The hydroxyl groups in ring A (5 and 7) contribute to the transition of metal ion chelating activity, whereas the groups in ring B (3', 4', and 5') are generally in charge of the free radical scavenging capacity [52]. The stability of flavonoid radicals is another benefit of the –OH group at position 3 of the C ring, which enhances myricetin's antioxidant properties [53]. Therefore, myricetin's hydroxyl-rich chemical structure allows neutralizing reactive oxygen species (ROS) by donating hydrogen and electrons [54].

Myricetin has physicochemical characteristics as a pale yellow crystalline powder. Strong internal hydrogen bonding and the planarity of its aromatic structure limit this compound's solubility in water, despite

the fact that it has several hydroxyl groups, which make it relatively polar [55]. In contrast, myricetin is more soluble in polar organic solvents such as ethanol, methanol, and dimethyl sulfoxide (DMSO) [56]. According to reports, this compound's melting point ranges from 357 to 360 °C, demonstrating the resilience of polyphenols' aromatic structure [57].

There are a number of outside variables that affect myricetin stability. This compound is highly stable in acidic pH environments (like the stomach environment), but it readily undergoes oxidative degradation and isomerization in neutral to alkaline pH environments (like the small intestine environment) [58]. Degradation is also accelerated by exposure to light and high temperatures, which can reduce biological activity by generating oxidation products [59]. This explains why pure myricetin typically loses stability when food is processed or stored.

The utilization of myricetin is significantly hampered by its physicochemical characteristics from a pharmacokinetic point of view. The quantity of active aglycone that enters the systemic circulation is decreased by quick phase II metabolism (glucuronidation, sulfation, and methylation), and intestine absorption is restricted by its poor water solubility [60]. Consequently, myricetin's oral bioavailability is comparatively poor in comparison to other flavonols [20]. Thus, contemporary research focuses on attempts to improve bioavailability by altering physicochemical features, such as via derivatization or complex formation.

Furthermore, myricetin's chemical characteristics enable its interactions with biomolecules. The hydroxyl group and its aromatic conjugation system can intercalate to DNA and bind to proteins via hydrophobic and hydrogen interactions [61]. Metal chelating activity is crucial in stopping the Fenton reaction, which generates hazardous hydroxyl radicals, particularly with regard to Fe^{2+} and Cu^{2+} ions [62]. However, this ability also has the potential to disrupt mineral homeostasis when consumed in very high concentrations [30].

Myricetin has a higher antioxidant activity than quercetin or kaempferol when compared to other flavonols, mostly because it possesses an extra hydroxyl group on the B ring [4]. Nevertheless, this additional hydroxyl group also decreases its chemical stability by increasing its susceptibility to oxidation [63]. In other words, the primary constraint on the use of myricetin is its superior chemical structure.

3.3. Myricetin bioavailability: Absorption, metabolism, distribution, and elimination

Absorption: Myricetin is typically found as glycosides attached to sugar groups after being ingested from plant sources [5]. This compound must be hydrolyzed by the β -glucosidase enzyme in the small intestine or by the colonic microbiota to become a more easily absorbed aglycone form [64]. However, the bioavailability of myricetin is highly limited because its polyhydroxyl chemical nature makes it poorly soluble in fat so that the passive diffusion process in the enterocyte membrane becomes inefficient [65]. Furthermore, myricetin stability in the gastrointestinal tract is limited; exposure to digestive enzymes and the neutral pH of the intestines might cause its breakdown [66]. As a result, very little of the oral intake makes it into the bloodstream.

Metabolism: Myricetin promptly goes through first-pass metabolism in the liver and enterocytes upon effective absorption [11]. These metabolic activities include glucuronidation, sulfation, and O-methylation, which are mediated by transferase enzymes such catechol-O-methyltransferase (COMT), sulfotransferase (SULT), and UDP-glucuronosyltransferase (UGT) [67]. Therefore, conjugated metabolites of myricetin are more prevalent in plasma than free aglycones [68]. Certain metabolites, such as antioxidants or cell signal modulators, have their own biological function even when this metabolism lowers the quantity of the parent chemical [55]. However, a significant factor limiting myricetin's bioeffectiveness at target tissues is still substantial conjugation [19].

Distribution: Myricetin's distribution profile demonstrates that it can reach a variety of tissues, with a particular predisposition to the brain, liver, kidney, and lungs [13]. According to experimental animal research, myricetin has a restricted capacity to cross the blood-brain barrier, which may contribute to its ability to prevent neurodegenerative diseases [69]. Myricetin and its metabolites are crucial for regulating detoxification enzymes and preventing oxidative stress in the liver [70]. However, the dosage form, timing of administration, and dose all have a significant impact on tissue concentrations [11].

Elimination: The main ways that myricetin is evacuated through are bile and urine [71]. The metabolites resulting from glucuronidation and sulfation are water-soluble and therefore easily excreted by the kidneys [72]. A comparatively minor portion is eliminated in the bile and may go through enterohepatic cycle [13]. Myricetin typically has a short elimination half-life, which could account for the low plasma levels following oral dosing [57]. Although it is uncommon for these compounds

to accumulate, long-term ingestion of natural foods can keep the body's levels at a specific baseline [73].

3.4. Factors affecting the stability and bioavailability of myricetin

The bioavailability of myricetin is one of the main determinants of its biological effectiveness in humans [74]. Despite the fact that these compounds are known to possess neuroprotective, anti-inflammatory, anti-cancer, and antioxidant properties, their efficacy is frequently limited because of the low plasma concentrations attained upon oral ingestion [20]. The chemical characteristics of myricetin, the surrounding environment, and bodily biological interactions are some of the interconnected elements that contribute to this [75]. Figure 1 provides an overview of myricetin, highlighting its main dietary sources, core chemical structure, and the principal factors that affect its stability and bioavailability.

Myricetin is extremely reactive due to its polyhydroxyl structure, which contains six hydroxyl groups [52]. This property makes it easily oxidized when exposed to light, oxygen, or neutral to alkaline pH such as in the small intestine [59]. Food processing techniques like boiling or baking can drastically lower the quantities of this chemical because of its limited heat stability [76]. Therefore, the amount of myricetin that is still available for the body to absorb depends in large part on physicochemical variables and food preparation [77].

Bioavailability is also influenced by biological circumstances in the digestive tract in addition to chemical considerations. Myricetin in the form of glycosides should be hydrolyzed by the enzyme β -glucosidase or intestinal microbiota to become an absorbable aglycone form [78]. Individual differences in microbiota makeup result in wide variations in absorption rates. Myricetin is subjected to a rigorous first-pass metabolism in the liver upon absorption, which includes glucuronidation, sulfation, and methylation [79]. The quantity of myricetin in free form that circulates in the plasma is greatly decreased by this mechanism, however some of its conjugated metabolites still have some biological activity [80].

Stability and bioavailability are also influenced by interactions with other dietary ingredients. For instance, myricetin can undergo oxidative degradation due to complex formation from metal ions like Fe^{2+} and Cu^{2+} [59]. Conversely, absorption can be facilitated by increasing their solubility in the intestinal micelle phase through its co-consumption together with lipids or phospholipids [81]. Myricetin oxidation during gastrointestinal transit may be prevented by other antioxidants, such as vitamin C, which may also have a protective effect [82]. These factors

suggest that overall dietary patterns may modulate the effectiveness of myricetin.

Myricetin's low bioavailability has prompted the creation of several formulation techniques for use in clinical and nutraceutical purposes [83]. Several strategies have been shown to be successful, such as complexation with cyclodextrins to enhance stability, liposomes and micelles to boost solubility, and polymer- or lipid-based nanoencapsulation to prevent myricetin from degrading [84]. This method has the potential to be improved in people and has continuously demonstrated elevated plasma myricetin concentrations in animal studies [85].

4. Biological mechanisms of myricetin

Myricetin's biological effects on health are mediated by a number of interconnected molecular pathways. This compound not only demonstrates antioxidant action by scavenging reactive oxygen species (ROS) and altering endogenous defense enzymes, but it also contributes to the regulation of the NF- κ B pathway and proinflammatory enzymes like COX and iNOS [86]. Furthermore, myricetin affects important intracellular signals that are involved in metabolism, apoptosis, and cell division, such as AMPK, PI3K/AKT, and MAPK [87]. Additionally, this compound may have long-term impacts on cellular homeostasis and the prevention of degenerative diseases through its potential in epigenetic control and gene expression [54].

4.1. Antioxidant activity of myricetin

A pathological state known as oxidative stress is defined by an imbalance between the body's ability to defend itself against oxidative stress and the generation of reactive oxygen species (ROS) [88]. Overproduction of ROS can harm proteins, lipids, and DNA, which can aid in the etiology of a number of chronic degenerative illnesses, including diabetes mellitus, cancer, cardiovascular disease, and neurodegenerative diseases [89]. Accordingly, myricetin, a flavonol that is widely present in fruits, vegetables, tea, and red wine, has a high potential for antioxidant activity through both direct and indirect action mechanisms [90].

Scavenging ROS: Myricetin's direct neutralization of ROS is the primary mechanism behind its antioxidant action [91]. Because myricetin has a lot of hydroxyl groups ($-OH$) at positions 3, 5, 7, 3', 4', and 5' in its chemical structure, it can act as an electron or proton donor and change ROS into a more stable and innocuous form [13]. For instance, myricetin can lower the known highly reactive and biomolecule-damaging hydroxyl

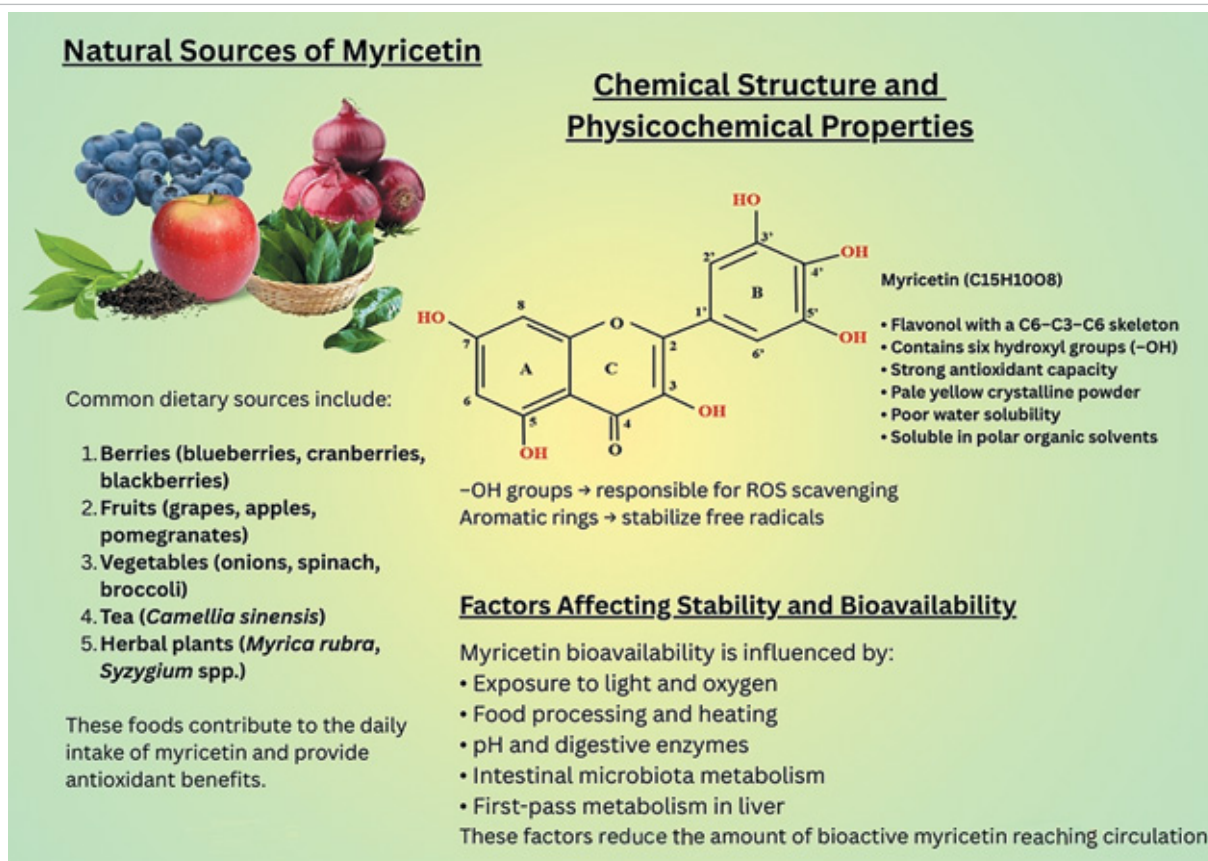


Figure 1. Natural sources, chemical structure, and factors influencing the stability and bioavailability of myricetin
Рисунок 1. Природные источники, химическая структура и факторы, влияющие на стабильность и биодоступность мирицетина

radicals ($\bullet\text{OH}$), superoxide (O_2^-), and peroxy radicals ($\text{ROO}\bullet$) [4]. Furthermore, electron resonance is supported by the conjugated double bond system in the aromatic ring, which makes the myricetin radical that results from the reaction with ROS comparatively stable [92]. This mechanism of scavenging radicals efficiently interrupts the series of oxidative events that might lead to lipid peroxidation and cell membrane damage [93].

Modulation of endogenous antioxidant enzymes: Furthermore, myricetin affects molecular pathways that control the expression of endogenous antioxidant enzymes in addition to its direct role as a radical scavenger [22]. Research shows that myricetin can activate the transcription factor nuclear factor erythroid 2-related factor 2 (Nrf2) [94]. The translocation of Nrf2 into the cell nucleus upon activation results in its binding to the DNA's antioxidant response element (ARE), which raises the transcription of several defensive genes [95]. These target genes include those that encode vital enzymes like glutathione peroxidase (GPx), catalase (CAT), and superoxide dismutase (SOD) [96]. Myricetin increases the ability of cells to defend against oxidative stress by activating the Nrf2-ARE pathway [97].

Increased SOD expression allows converting superoxide to hydrogen peroxide (H_2O_2), which is further degraded to water and oxygen by catalase and GPx [98]. Myricetin thereby improves the enzymatic ability that sustains long-term redox equilibrium in addition to immediately removing ROS [99]. Myricetin differs from simple antioxidants that merely act chemically and don't alter cellular signalling pathways because of its dual action [11].

Biomedical implications: Myricetin's ability to scavenge reactive oxygen species (ROS) and modulate antioxidant enzymes makes it a highly relevant supplement for the prevention and treatment of disorders linked to oxidative stress [100]. Protecting the vascular endothelium can lower the risk of atherosclerosis in the cardiovascular system [101]. Myricetin may be able to decrease the progression of neurodegenerative disorders like Parkinson's and Alzheimer's by reducing the accumulation of ROS in the central nervous system [102]. However, myricetin may also help prevent carcinogenesis by lowering DNA damage caused by free radicals [103].

4.2. Anti-inflammatory activity of myricetin

The body uses inflammation as a physiological defense against infection and tissue damage, but excessive or persistent inflammation can lead to the development of a number of degenerative diseases, including as cancer, atherosclerosis, arthritis, and neurological diseases [104]. The main molecular pathways involved in the regulation of inflammation are nuclear factor-kappa B (NF- κ B), cyclooxygenase (COX) enzymes, and inducible nitric oxide synthase (iNOS) [105]. Myricetin, a flavonol found in abundance in fruits, vegetables, tea, and red wine, has been demonstrated in numerous studies to have a strong anti-inflammatory effect by influencing these three targets [106–108].

NF- κ B pathway inhibition: NF- κ B is a central transcription factor that regulates the expression of various proinflammatory mediators, including cytokines (TNF- α , IL-1 β , IL-6), chemokines, COX-2, and iNOS [109]. NF- κ B activation is typically brought on by proinflammatory cytokines or inflammatory signals like lipopolysaccharide (LPS) [110]. Translocation of the NF- κ B component into the cell nucleus is made possible by the breakdown of the I κ B inhibitor [111]. According to reports, myricetin prevents NF- κ B from translocating to the nucleus by inhibiting the phosphorylation and degradation of I κ B [112]. This lowers the synthesis of inflammatory mediators by suppressing the expression of pro-inflammatory genes. Myricetin suppresses the inflammatory response's amplification, which frequently causes tissue damage, by this mechanism [113].

COX enzyme modulation: COX is a key enzyme in the biosynthesis of prostaglandins, lipid mediators involved in vasodilation, pain, and edema during inflammation [114]. The COX-2 isoform is a key target of non-steroidal anti-inflammatory drug (NSAID) therapy and is markedly increased during inflammation [115]. According to research conducted both in vitro and in vivo, myricetin can decrease the synthesis of prostaglandin E2 (PGE2) and inhibit COX-2 expression at both the transcriptional and translational stages [116,117]. Given that flavonoid modulation is typically more selective and has no influence on COX-1, which is crucial for physiological function, this action implies that myricetin may behave similarly to NSAID mechanisms, but with a lower risk of adverse effects [118].

Suppression of iNOS expression: an enzyme called iNOS is in charge of producing a lot of nitric oxide (NO) when inflammation occurs [119]. Despite the fact that NO plays crucial physiological roles in neurotransmission and vasodilation, excessive synthesis brought on by iNOS activation can result in nitrosative stress and cell damage [120]. It is well known that myricetin can reduce the buildup of NO in inflammatory tissues by transcriptionally suppressing iNOS expression [121]. Therefore, myricetin not only lessens oxidative damage caused by NO, but it also lessens chronic inflammation, which frequently makes tissue damage worse [6].

Biomedical implications: Myricetin's modulation of NF- κ B, COX, and iNOS signaling has wide-ranging therapeutic effects [122]. Inhibiting vascular inflammation may help stop atherogenesis in cardiovascular disease [123]. Suppression of the microglia inflammatory pathway can reduce the rate of neuronal damage in neurodegenerative disorders [124]. In contrast, myricetin's anti-inflammatory properties help lower the pro-inflammatory milieu that promotes tumor cell growth and dissemination in cancerous situations [125]. This demonstrates myricetin's potential as a pleiotropic, naturally occurring anti-inflammatory agent [19].

4.3. Modulation of cellular signaling pathways by myricetin

Intracellular signals are crucial for controlling energy balance, differentiation, apoptosis, and proliferation [126]. Deregulation of these signalling pathways has a role in the pathophysiology of a number of chronic illnesses, such as diabetes, cancer, cardiovascular problems, and neurodegenerative diseases [127]. A polyphenolic flavonoid that is common in tea, fruits, and vegetables, myricetin has been demonstrated to alter a number of molecular signalling pathways [11]. Regarding the biological effects of myricetin, the three primary pathways that have been most thoroughly investigated are AMP-activated protein kinase (AMPK), phosphoinositide 3-kinase/protein kinase B (PI3K/AKT), and mitogen-activated protein kinase (MAPK) [128].

MAPK path regulation: The MAPK pathway, which controls how cells react to oxidative stress, inflammation, and proliferation, is made up of ERK, JNK, and p38 MAPK [129]. Chronic inflammation or pathological apoptosis may result from excessive activation of MAPK pathways, especially JNK and p38 [130]. According to numerous studies, myricetin can prevent JNK and p38 from becoming phosphorylated, which lowers the production of proinflammatory cytokines like TNF- α and IL-1 β and lessens oxidative stress-induced apoptosis [131,132]. On the other hand, myricetin can sometimes trigger ERK to promote healthy tissue regeneration or cell division [133]. According to this selective modulation, myricetin functions contextually, adjusting its effects to the cell's microenvironmental circumstances [12].

Modulation of the PI3K/AKT pathway: One important signalling pathway that controls angiogenesis, metabolism, cell growth, and survival is PI3K/AKT [134]. Many malignancies have abnormal PI3K/AKT activation, which results in unchecked growth and resistance to apoptosis [135]. It has been demonstrated that myricetin inhibits AKT phosphorylation and PI3K activation, which lowers the expression of anti-apoptotic proteins (survivin, Bcl-2) and increases the expression of proapoptotic proteins (caspase, Bax) [136]. Furthermore, myricetin can improve glucose transport in metabolic disorders like insulin resistance by altering the PI3K/AKT pathway in muscle and adipose cells, which in turn increases insulin sensitivity [137]. This demonstrates myricetin's dualistic effects, which include promoting metabolic balance and inhibiting pathogenic PI3K/AKT activity in cancer [13].

AMPK pathway activation: A cellular energy sensor called AMPK is crucial for preserving the equilibrium of energy metabolism [138]. AMPK activation promotes glucose absorption, suppresses lipid production, and boosts fatty acid oxidation [139]. According to reports, myricetin causes AMPK α phosphorylation and increases the AMP/ATP ratio, activating AMPK [140]. This activation has beneficial effects on preventing non-alcoholic fatty liver disease (NAFLD), type 2 diabetes, and obesity [141]. Furthermore, myricetin-induced AMPK activation has the ability to block mTOR, a crucial regulator of cell growth and proliferation, indicating anticancer potential [19].

Biomedical implications: Furthermore, myricetin-induced AMPK activation has the ability to block mTOR, a crucial regulator of cell growth and proliferation, indicating anticancer potential [142]. Myocardial protection in the circulatory system is facilitated by both AMPK activation and MAPK-mediated oxidative stress suppression [143]. PI3K/AKT modulation and AMPK stimulation enhance glucose and lipid balance in a metabolic setting [144]. In contrast, myricetin inhibits PI3K/AKT and p38 MAPK in cancer to decrease growth and trigger apoptosis [14]. Thus, myricetin addresses several important molecular pathways in human health, acting as a multifunctional modulator [19].

4.4. Epigenetic effects and gene regulation by myricetin

Heritable changes to gene expression that do not alter the DNA sequence are known as epigenetics. These changes are mostly caused by DNA methylation, histone modifications, and the control of non-coding RNAs (miRNAs/lncRNAs) [145]. According to a number of preclinical investigations, the polyphenolic flavonol myricetin can contextually alter all three levels of control, impacting a network of signalling pathways linked to inflammation, oxidative stress, metabolism, and carcinogenesis [146]. Figure 2 shows the interconnected molecular mechanisms of

myricetin, including its antioxidant effects through ROS scavenging and Nrf2 activation, anti-inflammatory activity via NF- κ B, COX-2, and iNOS suppression, modulation of AMPK, PI3K/AKT, and MAPK signaling pathways, and epigenetic regulation, which together contribute to cardiovascular protection, neuroprotection, and anticancer effects.

DNA methylation (DNMT-centric): Many important genes, such as antioxidant, tumor suppressor, and anti-inflammatory genes, have their «on/off» status determined by their promoter methylation patterns [147]. In a number of cell models, myricetin has been shown to inhibit DNA methyltransferase (DNMT1/3A/3B) production and activity. This is linked to the hypomethylation of protective gene promoters and the transcriptional restoration of those promoters [148]. Functionally, this can boost the transcription of genes that regulate the cell cycle and apoptosis, as well as those that are antioxidant and anti-stress. Large-scale methylome analysis is necessary to confirm generalizations across tissues because demethylation patterns vary by locus and are impacted by exposure duration and dose [149].

Histone modifications (HDAC/HAT/HMT/HDM): Chromatin accessibility is controlled by the ratio of histone acetylation to methylation [150]. Myricetin is known to alter histone methyltransferase/demethylase and HDAC/HAT, two enzymes that erase and write histones [151]. H3/H4 acetylation can be increased, chromatin can be loosened, and the transcription of cytoprotective genes (such as antioxidant pathways) can be encouraged by inhibiting specific HDACs [152]. However, myricetin can reduce the transactivation of proinflammatory genes (COX-2, iNOS) via suppressing the activity of p300/CBP HAT against NF- κ B in the context of inflammation [116]. There are signs that myricetin either enhances active marks (H3K4me3) or decreases repressive marks like H3K27me3 (for example, by suppressing HMTs like EZH2) or H3K9me2/3 in specific models [153]. In the end, gene expression is reprogrammed to steer cells toward a less proliferative and proinflammatory state.

Regulation of non-coding RNAs (miRNA/lncRNA): Additionally, myricetin alters miRNA profiles that target important pathways [154]. Increases in anti-inflammatory/anti-proliferative miRNAs can inhibit genes in the cell cycle factor, PI3K/AKT, or NF- κ B axes [14]. It is possible to downregulate pro-survival/pro-angiogenic miRNAs, which would reduce the expression of targets that promote angiogenesis, migration, and proliferation [155]. The downstream consequences of these miRNA alterations are frequently explained by enhanced glucose transporter and fatty acid oxidation genes in metabolic contexts, or decreased Bcl-2/survivin, increased Bax/caspase, and VEGF/MMP suppression in cancer models [156]. Although the evidence is still being gathered, interactions with certain lncRNAs have also been documented, providing support for chromatin regulation and mRNA stability [157].

Crosstalk with key transcription factors: Myricetin epigenetics is linked to NF- κ B, AP-1, p53, and Nrf2-ARE regulation [54]. Chromatin relaxing at target promoters frequently precedes Nrf2 activation, which promotes transcription of HO-1, NQO1, GCLC, and other redox genes [158]. NF- κ B suppression is dual in nature: Limitation of acetyltransferase co-activator (p300/CBP) and chromatin accessibility at NF- κ B response elements [159]. Modification in p53 acetylation or activity in response to DNA damage or stress might cause a cell to choose between planned apoptosis or DNA repair [160].

Biomedical implications: Myricetin epigenetics can improve fatty acid oxidation through the AMPK-SIRT1-PGC-1 α axis, which is likewise reliant on the histone/PGC-1 α acetylation status, and decrease the production of lipogenic genes (e.g. downstream of SREBP-1c) in cardiometabolic [161]. Silencing repressive histone marks and selectively demethylating suppressor gene promoters in oncology slows EMT/angiogenesis, decreases cancer cells proliferation, and initiates their death [162]. The foundation for neuroprotective effects in neurology is the normalization of neuroprotective miRNAs and the improvement of the antioxidant-anti-inflammatory program (Nrf2 \uparrow /NF- κ B \downarrow) [163].

5. Health effects of myricetin

Various studies have shown that myricetin has a broad spectrum of health benefits through complex biological mechanisms. This compound not only provides protection to the cardiovascular system through vasodilatory effects and improved endothelial function, but also plays a role in metabolic regulation by increasing insulin sensitivity and controlling lipid metabolism [5]. Myricetin has a neuroprotective effect by slowing the progression of neurodegenerative illnesses including Parkinson's and Alzheimer's and preventing damage to neurons [164]. Furthermore, its antiproliferative, pro-apoptotic, and angiogenesis and metastasis-inhibiting properties demonstrate its potential in oncology and even provide support to its usage as an adjuvant in cancer therapy [19]. Furthermore, myricetin has antibacterial and antiviral properties, and its hepatoprotective, photoprotective, and immunomodulatory properties, which fortify the body's defenses, offer extra protection [11].

5.1. Cardiovascular

Myricetin has shown protective potential for the cardiovascular system through several mechanisms. This compound can reduce blood pressure by enhancing the generation of nitric oxide (NO), which is crucial for vasodilation, by raising the activity of the endothelial nitric oxide synthase (eNOS) enzyme [165]. It also has vasoprotective benefits by lowering endothelial cell oxidative stress and inhibiting monocyte adhesion,

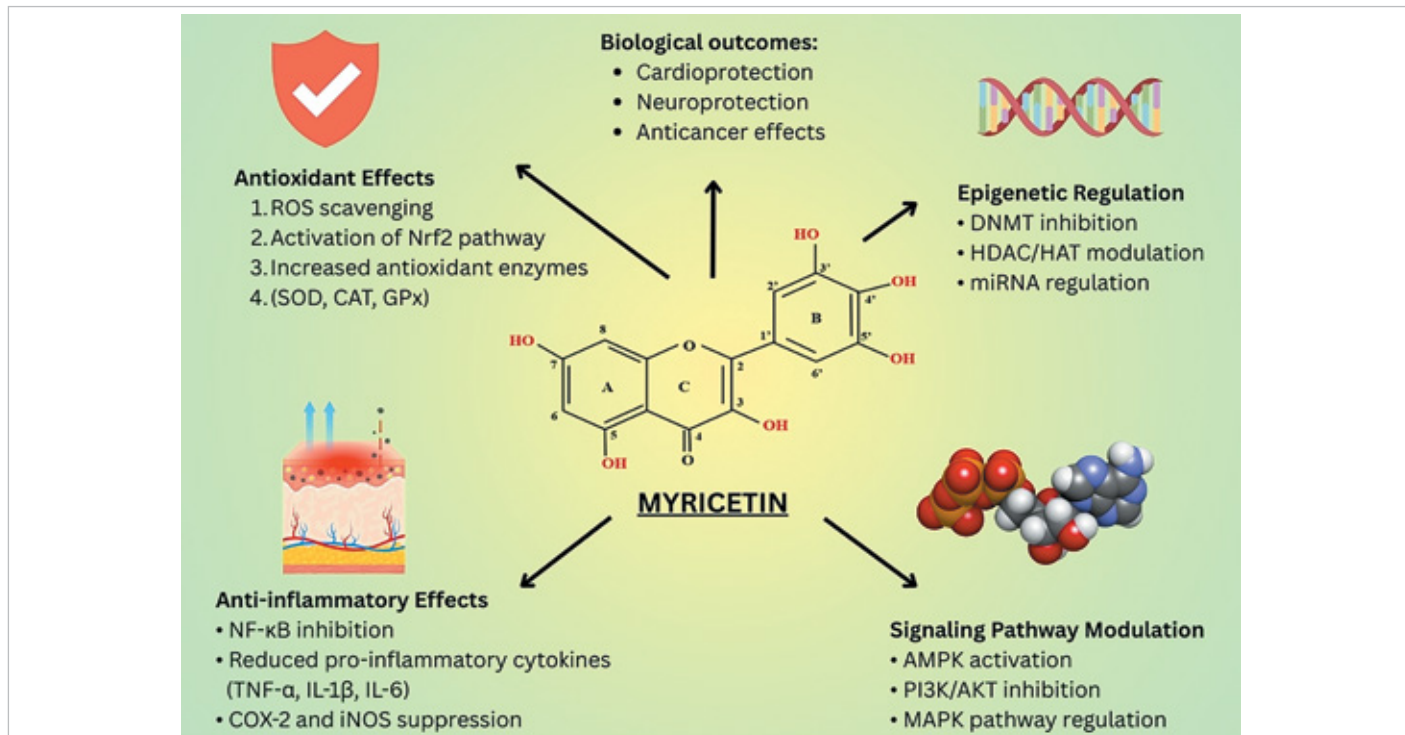


Figure 2. Antioxidant, anti-inflammatory, signaling, and epigenetic mechanisms of myricetin in promoting cardiovascular protective, neuroprotective, and anticancer effects

Рисунок 2. Антиоксидантные, противовоспалительные, сигнальные и эпигенетические механизмы мирицетина, способствующие кардиозащитному, нейропротекторному и противораковому действию

a precursor to atherosclerosis [166]. Myricetin is also helpful in reducing dyslipidemia and atherosclerosis since it helps to increase HDL fractions and decrease total cholesterol and triglyceride levels [17].

5.2. Metabolic

Myricetin exhibits strong antidiabetic effects in a metabolic setting [167]. This compound raises insulin sensitivity by activating the AMPK pathway, which causes the liver to produce less glucose and muscle and fat cells to absorb more glucose [168]. Furthermore, myricetin can slow down the intestinal absorption of glucose by blocking the action of the enzyme α -glucosidase [169]. Its effects are also shown in the regulation of lipid metabolism, where myricetin may help avoid obesity and metabolic syndrome problems by suppressing lipogenesis and stimulating fatty acid oxidation [170].

5.3. Neuroprotective

Myricetin's capacity to prevent the aggregation of neurotoxic proteins and lessen the buildup of oxidative stress is intimately linked to its neuroprotective properties [171]. Myricetin has been demonstrated to prevent the development of β -amyloid fibrils and lessen the neurotoxicity they produce in Alzheimer's disease [172]. This compound can maintain mitochondrial activity and shield dopaminergic neurons from oxidative stress in Parkinson's disease [173]. Furthermore, myricetin boosts the brain's natural antioxidant capacity, preserving cognitive function and halting neuronal deterioration [15].

5.4. Anticancer

Myricetin plays a wide range of roles in both cancer prevention and treatment [14]. Molecularly, this compound can restrict the growth of cancer cells by blocking the cell cycle in the G2/M phase and causing death by activating caspase-3 and raising the Bax/Bcl-2 ratio [174]. Moreover, myricetin inhibits angiogenesis by lowering VEGF expression and stops metastasis via altering cell adhesion molecules [175]. Interestingly, myricetin exhibits synergistic effects when combined with traditional chemotherapy medicines, suggesting that it could be used as an adjuvant in cancer treatment [175].

5.5. Antimicrobial

Apart from its anticancer and antioxidant qualities, myricetin also demonstrates broad-spectrum antimicrobial action, which includes antifungal, antiviral, and antibacterial qualities [11]. Myricetin has been shown to have antibacterial properties against a variety of harmful bacteria, including both Gram-positive and Gram-negative ones [176]. For instance, the mechanisms of myricetin sensitivity in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* include enhanced permeability, inhibition of important metabolic enzymes, and loss of cell membrane integrity [177]. Myricetin may also prevent the production of bacterial biofilms, which is a major contributor to antibiotic resistance, according to a number of studies [178–180]. As a result, myricetin may be utilized as an adjuvant to treat bacterial infections that are resistant to antibiotics.

5.6. Antiviral

Myricetin's antiviral qualities include the ability to inhibit the growth of different DNA and RNA viruses [113]. According to reports, this compound targets viral DNA polymerase and interferes with viral gene expression in the early stages of infection, hence inhibiting the replication of herpes simplex viruses (HSV-1 and HSV-2) [181]. Myricetin also exhibits antiviral efficacy against RNA viruses, including influenza A, hepatitis C virus (HCV), and SARS-CoV-2, by inhibiting the viral protease and RNA-dependent RNA polymerase (RdRp) enzymes, which are critical for reproduction [182–184]. This demonstrates that myricetin has the potential to be used directly as a treatment for some viral infections in addition to its preventive advantages through immunomodulatory actions [185].

5.7. Antifungi

Meanwhile, there has also been interest in myricetin's antifungal properties. According to in vitro experiments, myricetin can stop the growth of harmful fungus like *Aspergillus niger*, *Candida albicans*, and *Cryptococcus neoformans* [186–188]. The mechanism involves disrupting the biosynthesis of ergosterol, a key component of fungal cell membranes, thereby increasing membrane permeability and causing leakage of cellular contents [189]. Furthermore, myricetin triggers the accumulation of reactive oxygen species (ROS) in fungal cells, leading to oxidative stress and apoptosis [171]. Remarkably, this substance can also prevent the growth of *Candida* biofilms, which is frequently the primary source of resistance to traditional antifungal medications [187]. Therefore, myricetin may be created as an adjuvant or as a stand-alone medication to improve the efficacy of current antifungal therapies [6].

5.8. Other effects

Apart from the aforementioned primary advantages, myricetin also exhibits hepatoprotective properties by decreasing lipid peroxidation and boosting the activity of liver antioxidant enzymes, which may help avoid hepatocellular damage brought on by toxins or oxidative stress [79]. This compound has anti-aging and photoprotective properties in dermatology; it can prevent collagen degradation and decrease UV-induced DNA damage [190]. Not to be overlooked, myricetin also functions as an immunomodulator, specifically by regulating the innate and adaptive immune responses [113]. This prevents excessive inflammation and offers protection against infection. Figure 3 illustrates the diverse health effects of myricetin, including cardiovascular, metabolic, neuroprotective, anti-cancer, antimicrobial, and other protective benefits.

6. Safety and toxicity of myricetin

Safety and toxicity aspects are important considerations in evaluating the therapeutic potential of a bioactive compound, including myricetin. Although these flavonoids are generally considered safe as part of daily dietary consumption through fruits, vegetables, and tea, toxicological studies in animal models and pharmacological interaction data are still needed to ensure their safe use in pharmacological doses [11].

6.1. Toxicological data on experimental animals

Toxicological studies are an important aspect in assessing the safety of a bioactive compound, including myricetin, before its widespread application in humans [191]. A number of studies on experimental animals have been conducted to evaluate the potential acute, subchronic, and chronic toxicity of this compound. In general, myricetin exhibits a relatively low toxicity profile in various animal models, although some limitations still need to be considered. Table 2 describes the main results of myricetin toxicology tests in experimental animals, including acute, subchronic, reproductive, genotoxicity, and chronic toxicity.

According to acute toxicity testing, giving rats and mice large doses of myricetin did not result in any appreciable fatal side effects. The OECD classification of this chemical as relatively safe is supported by the stated LD₅₀ value of more than 2,000 mg/kg of body weight. High dosages often only cause minor gastrointestinal problems, like diarrhea and appetite loss, that don't seriously harm any organs [192].

According to subchronic toxicity tests, myricetin did not significantly alter hematological parameters, liver function (AST, ALT), or renal function (urea, creatinine) when administered repeatedly over a period of 28–90 days. Major organ histopathology, including those of the liver, kidneys, spleen, and heart, similarly revealed no notable structural anomalies. However, some publications have indicated symptoms of oxidative stress in the liver at very high dosages ($\geq 1,000$ mg/kgBW/day), suggesting a potential safe limit for long-term usage [193].

Furthermore, myricetin is comparatively harmless for the reproductive system, as evidenced by reproductive toxicology tests conducted on rats, which reveal that it has no effect on fertility, embryo development, or reproductive organ parameters [194]. The micronucleus assay and the Ames test yielded negative mutagenicity data, suggesting that this chemical is not genotoxic at physiological quantities [195].

Even though animal toxicology test results indicate a good safety profile, there are still a number of areas that require more investigation. First, there is currently a dearth of information regarding long-term chronic toxicity effects. Second, different animal species, dosage routes, and myricetin formulations may produce different outcomes. Furthermore, if delivery technologies that improve absorption are employed, the toxicity profile may change since pharmacokinetic and metabolic evidence indicate that limited bioavailability may decrease systemic exposure [196].

6.2. Safe daily consumption limits

The No Observed Adverse Effect Level (NOAEL) value from preclinical experiments is typically used to determine the safe limit for daily ingestion of a natural bioactive molecule. This value is then translated into an Acceptable Daily Intake (ADI) for humans by accounting for the safety factor [197]. According to the OECD guidelines, myricetin is classified as a chemical with a low toxicity level since toxicological investigations have demonstrated that it has a reasonably excellent safety profile with an oral LD₅₀ > 2000 mg/kgBW confirmed in experimental animals [198]. Table 3 describes toxicological data and estimates of safe limits for myricetin consumption based on experimental research and interspecies calculations.

Although there were signs of mild liver oxidative stress at the highest dose, subchronic investigations in rats given myricetin at doses up to 1000 mg/kgBW/day for 90 days did not reveal any appreciable changes in hematological parameters, liver function, kidney function, or histology [199]. The NOAEL in animal models is predicted to be between 500 and 1000 mg/kgBW/day based on these studies [200].

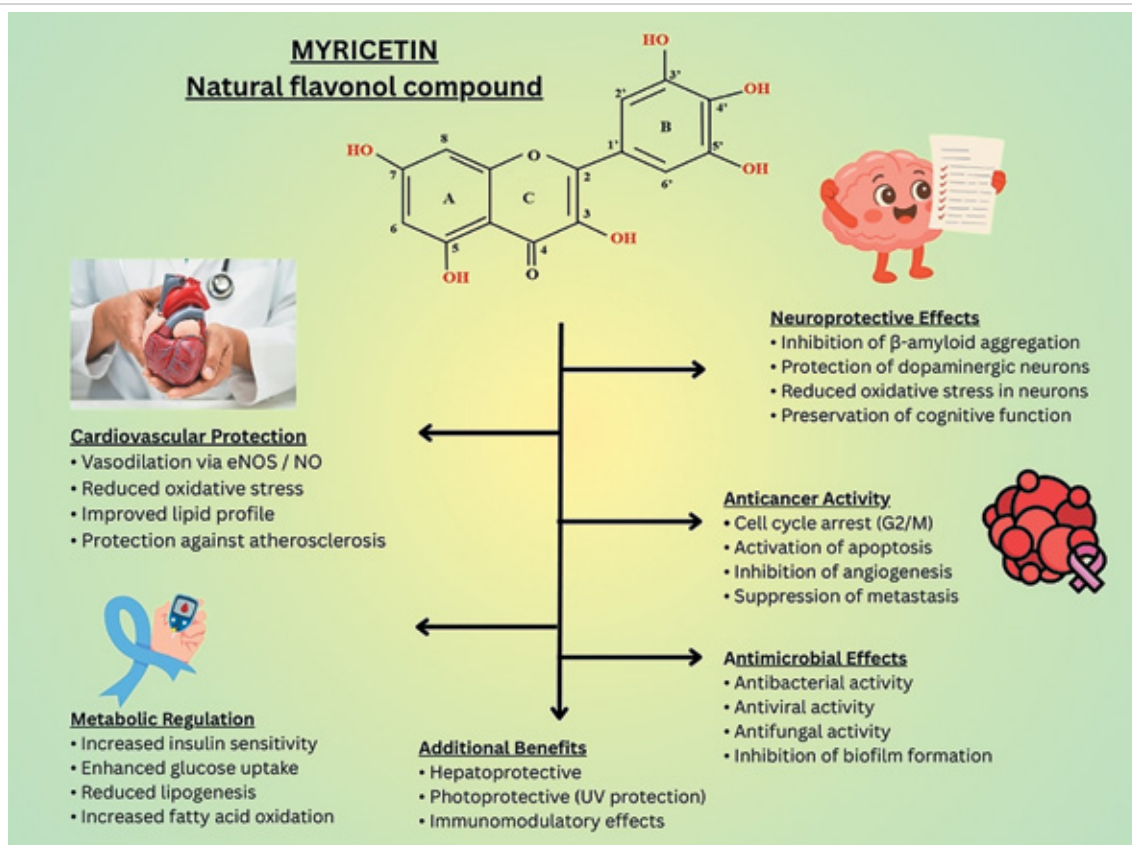


Figure 3. Overview of the health effects and biological mechanisms of myricetin
 Рисунок 3. Обзор влияния на здоровье и биологических механизмов действия мирицетина

Table 2. Toxicological data of myricetin in experimental animals

Таблица 2. Токсикологические данные по мирицетину в экспериментах над животными

Types of toxicology tests	Species/ Test	Tested dose	Key results	Information	Reference
Acute toxicity	Rats and mice	Up to > 2,000 mg/kgBW (oral)	There were no deaths, mild symptoms such as diarrhea and decreased appetite	LD ₅₀ > 2,000 mg/kgBW → considered safe (OECD)	[187]
Subchronic toxicity (28–90 days)	Rats	100–1,000 mg/kgBW/day	There were no significant changes in hematology, liver and kidney function; histopathology was normal	Doses ≥ 1,000 mg/kgBW/day trigger mild liver oxidative stress	[188]
Reproductive toxicity	Rats	Up to 500 mg/kgBW/day	Does not affect fertility, embryonic development, or reproductive organs	Safe for the reproductive system	[189]
Mutagenicity/Genotoxicity	Ames test and micronucleus assay	Physiological concentration	Negative result → not mutagenic/genotoxic	Supporting long-term security	[190]
Chronic (long-term) toxicity	Limited data	–	There have been no consistent reports of chronic toxicity effects	Needs further research	[191]

Table 3. Toxicological data and estimated safe daily consumption limits for myricetin

Таблица 3. Токсикологические данные и расчетные безопасные суточные нормы потребления мирицетина

Parameter	Scientific findings	Reference
LD ₅₀ oral (animal experiments)	> 2000 mg/kgBW → included in the low toxicity category according to the OECD	[193]
Subchronic studies in mice	90 days, doses up to 1000 mg/kgBW/day → no significant changes in hematology, liver, kidney, histopathology; the highest dose induces mild oxidative stress in the liver	[194]
NOAEL (rats)	500–1000 mg/kgBW/day	[195]
Conversion to human (HED)	≈ 50–100 mg/kgBW/day (based on body surface area)	[196]
Estimated ADI (with safety factor 100)	2–5 mg/kgBW/day → around 120–300 mg/day for adults weighing 60 kg	[13]
Official regulations	There has been no official ADI determination from FAO/WHO JECFA or EFSA	[190]
Natural diet intake	Usually < 10–20 mg/day from consumption of vegetables, fruit, tea, and other natural sources	[197]

The estimated ADI for humans is between 2 and 5 mg/kgBW/day, or 120 to 300 mg/day for an adult weighing 60 kg, if the NOAEL value of 500 mg/kgBW/day in rats is converted to humans using an interspecies conversion factor (based on body surface area) and a conservative safety factor of 100 is added [13,201]. Since international health organizations (FAO/WHO JECFA or EFSA) have not formally determined the safe limit for daily consumption of myricetin, this number is merely a conservative estimate [195].

In addition to supplements, myricetin can be found in a variety of natural foods, including tea, berries, spinach, kale, and onions. Consumption through a regular diet is regarded as safe because the average daily dietary intake of flavonoids (including myricetin) from the consumption of fruits

and vegetables is typically significantly lower than the toxic dose in animals [202]. However, the use of myricetin in high-dose supplement form still requires caution due to the lack of long-term clinical trials in humans.

6.3. Potential drug interactions

Myricetin is a polyhydroxy flavonoid found in many fruits, vegetables, teas, and herbs [4]. Apart from its anti-inflammatory, anti-cancer, and antioxidant properties, this compound may interact with medications due to its effects on membrane transporters, pharmacodynamic pathways, and enzymes involved in drug metabolism, particularly the cytochrome P450 system [203]. It's critical to comprehend these interactions

in order to lower the possibility of side effects or decrease the efficacy of treatment. Table 4 shows that myricetin can interact with various drugs through pharmacokinetic and pharmacodynamic mechanisms.

Research on the pharmacokinetics of myricetin has demonstrated that it inhibits a number of CYP450 isoenzymes, specifically CYP3A4, CYP2C9, and CYP2C19 [204–206]. This has consequences for elevated plasma levels of medications that are processed by this enzyme, including phenytoin, warfarin, cyclosporine, and statins, which may result in clinical toxicity. Furthermore, myricetin has an impact on P-glycoprotein (P-gp), a crucial membrane transporter involved in drug excretion [207]. P-gp inhibition may raise the bioavailability of substrate medications like doxorubicin or digoxin, which could raise the risk of nephrotoxicity or cardiotoxicity [207]. Figure 4 shows the safety and interactions of myricetin, indicating general safety from dietary sources with defined LD₅₀, NOAEL, ADI values, and potential interactions via CYP450, P-glycoprotein, and drug synergy.

Myricetin has antidiabetic effects (reducing blood glucose, increasing insulin sensitivity) that can work in concert with other antidiabetic medications, thus raising the risk of hypoglycemia from a pharmacodynamic standpoint [208]. Additionally, the anticoagulant and antiplatelet actions may intensify the effects of clopidogrel, aspirin, or warfarin, this way raising the risk of bleeding [209]. Furthermore, the effects of benzodiazepines and SSRI antidepressants might be amplified by the modulatory actions

of neurotransmitters (GABA, serotonin), leading to excessive sedation or mood swings [210].

7. Challenges and future prospects of myricetin

Numerous studies have demonstrated myricetin’s promise in terms of health advantages, but before this substance can be widely used in the pharmaceutical and functional food industries, a number of obstacles must be addressed. One of the main limitations is the lack of research continuity from *in vitro* to *in vivo* scale and clinical trials. Studies of cultured cells or animal models continue to provide the majority of the molecular evidence for antioxidant, anti-inflammatory, neuroprotective, and anticancer properties [54]. It is currently insufficient to establish safe and effective dosage recommendations because human clinical evidence is still scarce in terms of amount, sample size, and intervention duration [73]. This suggests that in order to prove the advantages of myricetin in human populations, controlled clinical trials with sound methods are required.

Another significant challenge is the low oral bioavailability of myricetin [211]. This compound has limited solubility in water and is susceptible to presystemic metabolism in the intestine and liver, thus resulting in low systemic concentrations after ingestion [11]. Its stability is further diminished by metabolism via glucuronidation and sulfatation, which frequently prevents biological effects on target tissues from occurring

Table 4. Potential drug interactions of myricetin based on mechanism

Таблица 4. Возможные взаимодействия мирицетина с лекарственными средствами на основе механизма его действия

Interaction mechanism	Potentially involved drugs	Possible effects	Reference
CYP3A4 enzyme inhibition	Statins (simvastatin and atorvastatin), calcium channel blockers, and cyclosporine	Increased plasma drug concentration → risk of toxicity	[198]
CYP2C9 & CYP2C19 Inhibition	Warfarin, phenytoin, and NSAIDs (ibuprofen and diclofenac)	Potential for bleeding (warfarin), increased sedation or toxicity of other drugs	[199–201]
P-glycoprotein (P-gp) inhibition	Digoxin, doxorubicin, and some antiretrovirals	Increased bioavailability → risk of cardiotoxic or nephrotoxic side effects	[202]
Pharmacodynamic interactions with antidiabetics	Metformin, insulin, and sulfonylureas	Additive effect of lowering blood glucose → hypoglycemia	[203]
Interactions with anticoagulant/antiplatelet agents	Warfarin, aspirin, and clopidogrel	Potential increased risk of bleeding	[204]
Interactions with neuroactive agents	Benzodiazepines and SSRI antidepressants	Additive effects on neurotransmitter modulation (e.g. GABA, serotonin) → sedation or mood interactions	[205]

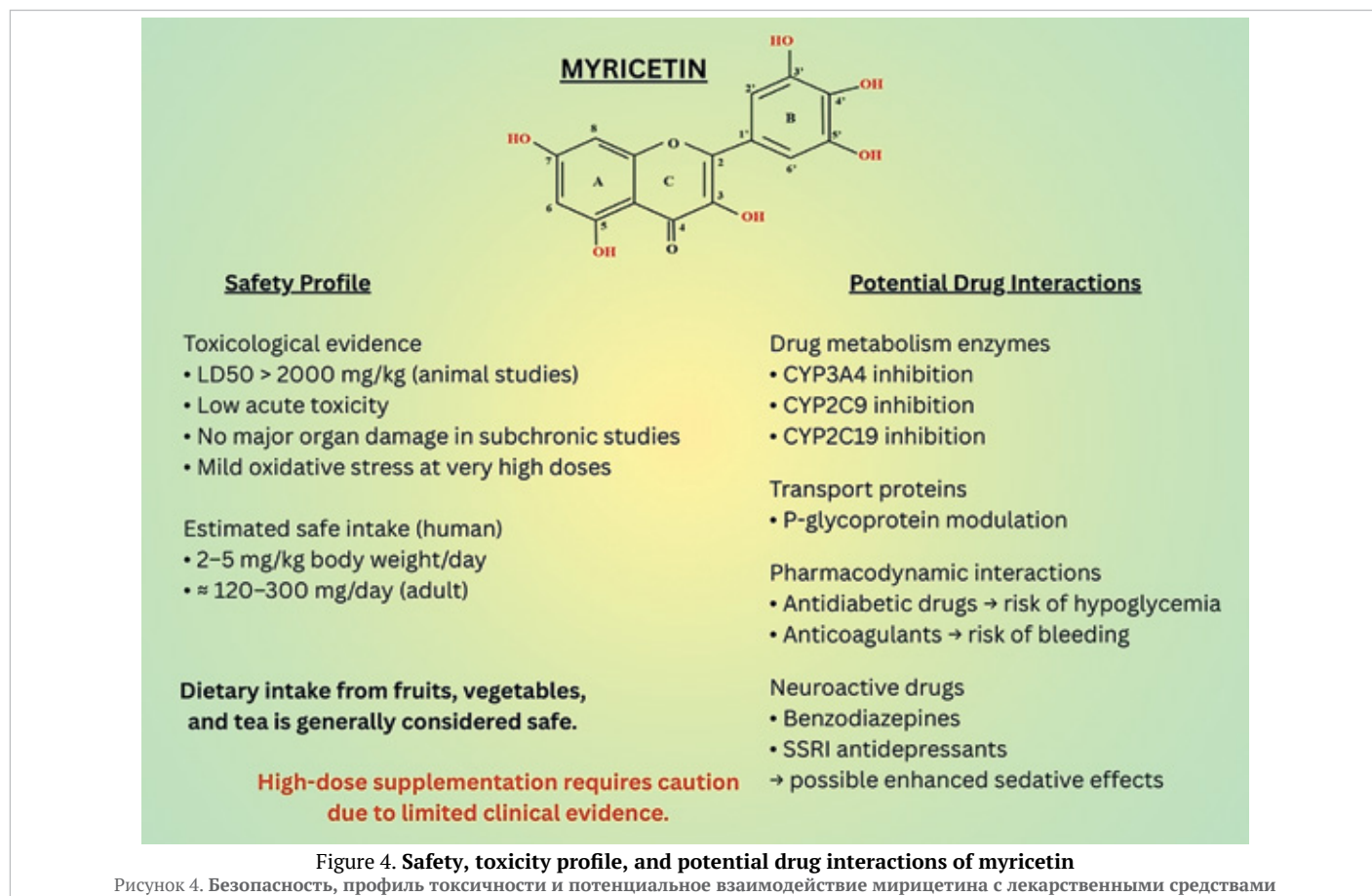


Figure 4. Safety, toxicity profile, and potential drug interactions of myricetin

Рисунок 4. Безопасность, профиль токсичности и потенциальное взаимодействие мирицетина с лекарственными средствами

at physiological levels [118]. Novel formulation techniques have been created to address this issue, such as complexation with cyclodextrins, liposome-based delivery systems, nanocapsules, and polymeric nanoparticles [212]. It has been demonstrated that this endeavour improves its intestine absorption, stability, and solubility, which may enhance myricetin's biological efficacy [6].

Future possibilities show that myricetin has a lot of potential for development in a variety of applications. This compound can be utilized in the food industry as a bioactive ingredient in functional food items, such as fermented goods, health drinks, or fortified snacks [213]. Myricetin can be prepared as a supplement in powder or capsule form with defined dosages to promote neuroprotective, cardiovascular, and metabolic health [79]. In the pharmaceutical industry, this compound shows promise as a candidate for adjuvant or supplementary medications, particularly in the treatment of cancer, neurological illnesses, and metabolic syndrome [214]. Advances in molecular identification techniques continue to play an important role in biomedical and veterinary research, enabling more accurate detection and characterization of pathogenic or-

ganisms and supporting improved disease management strategies [215]. Future research directions should focus on developing formulations that improve bioavailability, exploring synergistic combinations with other bioactive compounds, and conducting large-scale clinical trials to ensure safety and effectiveness in humans.

8. Conclusion

Myricetin is a flavonoid that has many health advantages, including antibacterial, cardioprotective, neuroprotective, anti-inflammatory, antioxidant, and anticancer properties. It works by influencing metabolic and epigenetic processes, controlling cellular signalling, and modifying oxidative stress. However, its application is severely hampered by low dosage guidelines, inadequate absorption, and deficit of extensive clinical data. Further research, particularly controlled clinical trials and the development of delivery technologies that enhance stability and bioavailability, is essential to ensure the safety and effectiveness of myricetin so that it can be optimized as a bioactive agent in functional foods and pharmaceutical therapies in the future.

REFERENCES

- Dias, M. C., Pinto, D. C. G. A., Silva, A. M. S. (2021). Plant flavonoids: Chemical characteristics and biological activity. *Molecules*, 26(17), Article 5377. <https://doi.org/10.3390/molecules26175377>
- Panche, A. N., Diwan, A. D., Chandra, S. R. (2016). Flavonoids: An overview. *Journal of Nutritional Science*, 5(1), Article e47. <https://doi.org/10.1017/jns.2016.41>
- Zahra, M., Abrahamse, H., George, B. P. (2024). Flavonoids: Antioxidant powerhouses and their role in nanomedicine. *Antioxidants*, 13(8), Article 922. <https://doi.org/10.3390/antiox13080922>
- Agraharam, G., Girigoswami, A., Girigoswami, K. (2022). Myricetin: A multi-functional flavonol in biomedicine. *Current Pharmacology Reports*, 8(1), 48–61. <https://doi.org/10.1007/s40495-021-00269-2>
- Taheri, Y., Suleria, H. A. R., Martins, N., Sytar, O., Beyati, A., Yeskaliyeva, B. et al. (2020). Myricetin bioactive effects: Moving from preclinical evidence to potential clinical applications. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 20(1), Article 241. <https://doi.org/10.1186/s12906-020-03033-z>
- Almatroodi, S. A., Rahmani, A. H. (2025). Unlocking the pharmacological potential of myricetin against various pathogenesis. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(9), Article 4188. <https://doi.org/10.3390/ijms26094188>
- Jiang, M., Zhu, M., Wang, L., Yu, S. (2019). Anti-tumor effects and associated molecular mechanisms of myricetin. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 120, Article 109506. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2019.109506>
- Sethiya, N. K., Ghiloria, N., Srivastava, A., Bisht, D., Chaudhary, S. K., Walia, V. et al. (2024). Therapeutic potential of myricetin in the treatment of neurological, neuropsychiatric, and neurodegenerative disorders. *CNS and Neurological Disorders – Drug Targets*, 23(7), 865–882. <https://doi.org/10.2174/1871527322666230718105358>
- Coelho, C. F. F., Souza, I. L. S., Chagas, V. T., Ribeiro, N. L. X., Pinto, B. A. S., França, L. M. et al. (2021). Myricetin improves metabolic outcomes but not cognitive deficit associated to metabolic syndrome in male mice. *Food and Function*, 12(8), 3586–3596. <https://doi.org/10.1039/d1fo00073j>
- Li, J., Luo, T., Zhao, Y., Wang, D., Jin, Y., Wu, Z. et al. (2024). Cardioprotective potentials of myricetin in doxorubicin-induced cardiotoxicity based on biochemical and transcriptomic analysis. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 175(1), Article 116748. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2024.116748>
- Imran, M., Saeed, F., Hussain, G., Imran, A., Mehmood, Z., Gondal, T. A. et al. (2021). Myricetin: A comprehensive review on its biological potentials. *Food Science and Nutrition*, 9(10), 5854–5868. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2513>
- Park, K. -S., Chong, Y., Kim, M. K. (2016). Myricetin: Biological activity related to human health. *Applied Biological Chemistry*, 59(1), 259–269. <https://doi.org/10.1007/s13765-016-0150-2>
- Semwal, D. K., Semwal, R. B., Combrinck, S., Viljoen, A. (2016). Myricetin: A dietary molecule with diverse biological activities. *Nutrients*, 8(2), Article 90. <https://doi.org/10.3390/nu8020090>
- Javed, Z., Khan, K., Herrera-Bravo, J., Naeem, S., Iqbal, M. J., Raza, Q. et al. (2022). Myricetin: Targeting signaling networks in cancer and its implication in chemotherapy. *Cancer Cell International*, 22(1), Article 239. <https://doi.org/10.1186/s12935-022-02663-2>
- Wang, L., Tang, Z., Li, B., Peng, Y., Yang, X., Xiao, Y. et al. (2024). Myricetin ameliorates cognitive impairment in 3×Tg Alzheimer's disease mice by regulating oxidative stress and tau hyperphosphorylation. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 177, Article 116963. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2024.116963>
- Li, Y., Zheng, X., Yi, X., Liu, C., Kong, D., Zhang, J. et al. (2017). Myricetin: A potential approach for the treatment of type 2 diabetes as a natural class B GPCR agonist. *FASEB Journal*, 31(6), 2603–2611. <https://doi.org/10.1096/fj.201601339R>
- Meng, Z., Wang, M., Xing, J., Liu, Y., Li, H. (2019). Myricetin ameliorates atherosclerosis in the low-density-lipoprotein receptor knock-out mice by suppression of cholesterol accumulation in macrophage foam cells. *Nutrition and Metabolism*, 16(1), Article 25. <https://doi.org/10.1186/s12986-019-0354-7>
- Goyal, A., Sikarwar, O., Verma, A., Solanki, K., Agrawal, N., Dube, N. et al. (2024). Unveiling myricetin's pharmacological potency: A comprehensive exploration of the molecular pathways with special focus on PI3K/AKT and Nrf2 signaling. *Journal of Biochemical and Molecular Toxicology*, 38(6), Article e23739. <https://doi.org/10.1002/jbt.23739>
- Rahmani, A. H., Almatroudi, A., Allemaille, K. S., Alwanian, W. M., Alharbi, B. F., Alrumaithi, F. et al. (2025). Myricetin: A significant emphasis on its anticancer potential via the modulation of inflammation and signal transduction pathways. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), Article 9665. <https://doi.org/10.3390/ijms24119665>
- Afroz, N., Pramodh, S., Hussain, A., Waleed, M., Vakharia, K. (2020). A review on myricetin as a potential therapeutic candidate for cancer prevention. *3 Biotech*, 10(5), Article 211. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02207-3>
- Ozcan, C., Yaman, M. (2014). Determination of myricetin in medicinal plants by high-performance liquid chromatography. *Instrumentation Science and Technology*, 43(1), 44–52. <https://doi.org/10.1080/10739149.2014.940533>
- Barzegar, A. (2016). Antioxidant activity of polyphenolic myricetin in vitro cell-free and cell-based systems. *Molecular Biology Research Communications*, 5(2), 87–95.
- Bouyahya, A., El Omari, N., El Hachlaf, N., El Jemly, M., Hakkour, M., Balahbib, A. et al. (2022). Chemical compounds of berry-derived polyphenols and their effects on gut microbiota, inflammation, and cancer. *Molecules*, 27(10), Article 3286. <https://doi.org/10.3390/molecules27103286>
- Janabi, A. H. W., Kambhoj, A. A., Saeed, M., Xiaoyu, L., Bibi, J., Majeed, F. et al. (2020). Flavonoid-rich foods (FRF): A promising nutraceutical approach against lifespan-shortening diseases. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 23(2), 140–155. <https://doi.org/10.22038/IJBMS.2019.35125.8355>
- Sabra, A., Netticadan, T., Wijekoon, C. (2021). Grape bioactive molecules, and the potential health benefits in reducing the risk of heart diseases. *Food Chemistry*, 12(1), Article 100149. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100149>
- Lombardo, M., Feraco, A., Camajani, E., Caprio, M., Armani, A. (2023). Health effects of red wine consumption: A narrative review of an issue that still deserves debate. *Nutrients*, 15(8), Article 1921. <https://doi.org/10.3390/nu15081921>
- Suriyaprom, S., Mosoni, P., Leroy, S., Kaewkud, T., Desvaux, M., Tragoolpua, Y. (2022). Antioxidants of fruit extracts as antimicrobial agents against pathogenic bacteria. *Antioxidants*, 11(3), Article 602. <https://doi.org/10.3390/antiox11030602>
- Chen, S., Wang, X., Cheng, Y., Gao, H., Chen, X. (2023). A review of classification, biosynthesis, biological activities and potential applications of flavonoids. *Molecules*, 28(13), Article 4982. <https://doi.org/10.3390/molecules28134982>
- Chagas, M. do S., Behrens, M. D., Moragas-Tellis, C. J., Penedo, G. X. M., Silva, A. R., Gonçalves-de-Albuquerque, C. F. (2022). Flavonols and flavones as potential anti-inflammatory, antioxidant, and antibacterial compounds. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2022(1), Article 9966750. <https://doi.org/10.1155/2022/9966750>
- Mahmud, A. R., Ema, T. I., Siddiquee, M. F.-R., Shahriar, A., Ahmed, H., Mosfeq-Ul-Hasan, M. et al. (2023). Natural flavonols: Actions, mechanisms, and potential therapeutic utility for various diseases. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 12(1), Article 47. <https://doi.org/10.1186/s43088-023-00387-4>
- Raiola, A., Errico, A., Petruk, G., Monti, D. M., Barone, A., Rigano, M. M. (2017). Bioactive compounds in Brassicaceae vegetables with a role in the prevention of chronic diseases. *Molecules*, 23(1), Article 15. <https://doi.org/10.3390/molecules23010015>
- Aboulwafa, M. M., Youssef, F. S., Gad, H. A., Altyar, A. E., Al-Azizi, M. M., Ashour, M. L. (2019). A comprehensive insight on the health benefits and phytoconstituents of *Camellia sinensis* and recent approaches for its quality control. *Antioxidants*, 8(10), Article 455. <https://doi.org/10.3390/antiox8100455>
- Aydemir, M. E., Takım, K., Yılmaz, M. A. (2023). Characterization of phenolic components of black teas of different origins and the effect of brewing duration on quality properties. *Food Science and Nutrition*, 12(1), 494–507. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3782>
- Zhao, Z., Chen, R., Ng, K. (2024). Effects of differently processed tea on the gut microbiota. *Molecules*, 29(17), Article 4020. <https://doi.org/10.3390/molecules29174020>
- Alemu, T. T., Abdullahi, M. A., Abamecha, N., Hamza, M. (2025). Contribution of nutritional and bioactive components of tea leaves in management of non-communicable chronic diseases: A comprehensive review. *Discover Food*, 5(1), Article 252. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00456-w>
- Georgiev, V., Ananga, A., Tsovala, V. (2014). Recent advances and uses of grape flavonoids as nutraceuticals. *Nutrients*, 6(1), 391–415. <https://doi.org/10.3390/nu6010391>
- González-Paramás, A. M., Esteban-Ruano, S., Santos-Buelga, C., de Pascual-Teresa, S., Rivas-Gonzalo, J. C. (2004). Flavanol content and antioxidant activity in winery byproducts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(2), 234–238. <https://doi.org/10.1021/jf0348727>
- Castaldo, L., Narváez, A., Izzo, L., Graziani, G., Gaspari, A., Minno, G. D. et al. (2019). Red wine consumption and cardiovascular health. *Molecules*, 24(19), Article 3626. <https://doi.org/10.3390/molecules24193626>

39. Zhang, X., Huang, H., Zhang, Q., Fan, F., Xu, C., Sun, C. et al. (2015). Phytochemical characterization of Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.) of 17 cultivars and their antioxidant properties. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(6), 12467–12481. <https://doi.org/10.3390/ijms160612467>
40. Arumugam, B., Manaharan, T., Heng, C.K., Kuppusamy, U. R., Palanisamy, U. D. (2014). Antioxidant and antiglycemic potentials of a standardized extract of *Syzygium malaccense*. *LWT – Food Science and Technology*, 59(2, Part 1), 707–712. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.041>
41. Nurelly, N., Putra, A. M. P., Nurrochmad, A., Widyarini, S., Fakhrudin, N. (2024). Extraction, phytochemicals, bioactivities, and toxicity of *Syzygium polyanthum*: A comprehensive review. *Journal of Hermed Pharmacology*, 13(5), 366–380. <https://doi.org/10.34172/jhp.2024.51454>
42. Pratama, B. P., Pranoto, Y., Supriyadi, Swasono, R. T. (2023). The properties of salam leaf extract (*Syzygium polyanthum*) with different solvent ratio and processing time using ultrasonication-assisted extraction method. *Chemical Engineering Journal*, 26(4), 581–587. [https://doi.org/10.6180/jase.202304_26\(4\).0015](https://doi.org/10.6180/jase.202304_26(4).0015)
43. Misgiati, M., Winarni, I., Murniasih, T., Novriyanti, E., Tarman, K., Safithri, M. et al. (2024). The anticancer and antioxidant potential of local sea cucumber *Holothuria edulis*, an ecology balancer of Labuan Bajo marine ecosystem. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9(3), Article 100625. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2024.100625>
44. Pratama, B. P., Pranoto, Y., Supriyadi, Swasono, R. T. (2022). The identification of β -ocimene biosynthetic pathway through mevalonate acid (MVA) and 1-deoxy-D-xylulose 5-phosphate (DXP) pathways using crude enzyme extracts in Indonesian bay leaf/salam leaf (*Syzygium polyanthum*). *Tropical Life Sciences Research*, 33(2), 1–18. <https://doi.org/10.21315/tlsr2022.33.2.1>
45. Zoratti, L., Karppinen, K., Escobar, A. L., Häggman, H., Jaakola, L. (2014). Light-controlled flavonoid biosynthesis in fruits. *Frontiers in Plant Science*, 5(1), Article 534. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00534>
46. Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., Jiménez, L. (2004). Polyphenols: Food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 79(5), 727–747. <https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727>
47. Devi, K. P., Rajavel, T., Habtemariam, S., Nabavi, S. F., Nabavi, S. M. (2015). Molecular mechanisms underlying anticancer effects of myricetin. *Life Sciences*, 142, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2015.10.004>
48. Parmenter, B. H., Thompson, A. S., Bondonno, N. P., Jennings, A., Murray, K., Perez-Cornago, A. et al. (2025). High diversity of dietary flavonoid intake is associated with a lower risk of all-cause mortality and major chronic diseases. *Nature Food*, 6(7), 668–680. <https://doi.org/10.1038/s43016-025-01176-1>
49. Su, H. M., Feng, L. N., Zheng, X. D., Chen, W. (2016). Myricetin protects against diet-induced obesity and ameliorates oxidative stress in C57BL/6 mice. *Journal of Zhejiang University – SCIENCE B*, 17(6), 437–446. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1600074>
50. Deriabina, A., Prutsikij, T., Ochoa, H. D. M., Jimenez, E. G., Deriabina, S. (2024). Comparative analysis of fluorescence emission in myricetin, kaempferol, and quercetin powders and solutions. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(5), Article 2558. <https://doi.org/10.3390/ijms25052558>
51. Yao, Y., Lin, G., Xie, Y., Ma, P., Li, G., Meng, Q. et al. (2014). Preformulation studies of myricetin: A natural antioxidant flavonoid. *Pharmazie*, 69(1), 19–26.
52. Jomová, K., Hudcová, L., Lauro, P., Simunkova, M., Alwasel, S. H., Alhazza, I. M. et al. (2019). A switch between antioxidant and prooxidant properties of the phenolic compounds myricetin, morin, 3',4'-dihydroxyflavone, taxifolin and 4-hydroxy-coumarin in the presence of copper(II) ions: A spectroscopic, absorption titration and DNA damage study. *Molecules*, 24(23), Article 4335. <https://doi.org/10.3390/molecules24234335>
53. Satari, A., Ghasemi, S., Habtemariam, S., Asgharian, S., Lorigooini, Z. (2021). Rutin: A flavonoid as an effective sensitizer for anticancer therapy; Insights into multifaceted mechanisms and applicability for combination therapy. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021(1), Article 9913179. <https://doi.org/10.1155/2021/9913179>
54. Charlton, N. C., Mastyugin, M., Török, B., Török, M. (2023). Structural features of small molecule antioxidants and strategic modifications to improve potential bioactivity. *Molecules*, 28(3), Article 1057. <https://doi.org/10.3390/molecules28031057>
55. Sadasivam, K., Kumaresan, R. (2011). Antioxidant behavior of mearnsin and myricetin flavonoid compounds – A DFT study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 79(1), 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.02.042>
56. Wu, C., He, L., Zhang, Y., You, C., Li, X., Jiang, P. et al. (2023). Separation of flavonoids with significant biological activity from *Acacia mearnsii* leaves. *RSC Advances*, 13(13), 9119–9127. <https://doi.org/10.1039/d3ra00209h>
57. Franklin, S. J., Myrdal, P. B. (2015). Solid-state and solution characterization of myricetin. *AAPS PharmSciTech*, 16(6), 1400–1408. <https://doi.org/10.1208/s12249-015-0329-6>
58. Yokomizo, A., Moriwaki, M. (2005). Myricitrin degraded by simulated digestion inhibits oxidation of human low-density lipoprotein. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 69(4), 693–699. <https://doi.org/10.1271/bbb.69.693>
59. Song, X., Tan, L., Wang, M., Ren, C., Guo, C., Yang, B. et al. (2021). Myricetin: A review of the most recent research. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 134, Article 111017. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.111017>
60. Wittig, J., Herderich, M., Graefe, E. U., Veit, M. (2001). Identification of quercetin glucuronides in human plasma by high-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications*, 753(2), 237–243. [https://doi.org/10.1016/s0378-4347\(00\)00549-1](https://doi.org/10.1016/s0378-4347(00)00549-1)
61. Huang, J., He, Z., Cheng, R., Cheng, Z., Wang, S., Wu, X. et al. (2020). Assessment of binding interaction dihydromyricetin and myricetin with bovine lactoferrin and effects on antioxidant activity. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 243(1), Article 118731. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118731>
62. Chobot, V., Hadacek, F. (2011). Exploration of pro-oxidant and antioxidant activities of the flavonoid myricetin. *Redox Report*, 16(6), 242–247. <https://doi.org/10.1179/1351000211Y.0000000015>
63. Sadzak, A., Vlašić, I., Kiralj, Z., Batarelo, M., Oršolić, N., Jembrek, M. J. et al. (2021). Neurotoxic effect of flavonol myricetin in the presence of excess copper. *Molecules*, 26(4), Article 845. <https://doi.org/10.3390/molecules26040845>
64. Kotik, M., Kulik, N., Valentová, K. (2023). Flavonoids as aglycones in retaining glycosidase-catalyzed reactions: Prospects for green chemistry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(41), 14890–14910. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04389>
65. Crespy, V., Morand, C., Besson, C., Manach, C., Demigne, C., Remesy, C. (2002). Quercetin, but not its glycosides, is absorbed from the rat stomach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(3), 618–621. <https://doi.org/10.1021/jf010919h>
66. Xiang, D., Wang, C. -g., Wang, W. -q., Shi, C. -y., Xiong, W., Wang, M. -d. et al. (2017). Gastrointestinal stability of dihydromyricetin, myricetin, and myricitrin: An in vitro investigation. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 68(6), 704–711. <https://doi.org/10.1080/09637486.2016.1276518>
67. Boronat, A., Rodriguez-Morató, J., Serrelli, G., Fitó, M., Tyndale, R. F., Deiana, M. et al. (2021). Contribution of biotransformations carried out by the microbiota, drug-metabolizing enzymes, and transport proteins to the biological activities of phytochemicals found in the diet. *Advances in Nutrition*, 12(6), 2172–2189. <https://doi.org/10.1093/advances/nmab085>
68. Dombi, A., Kaci, H., Valentová, K., Bakos, E., Özvegy-Laczka, C., Poór, M. (2024). Interaction of myricetin, ampelopsin (dihydromyricetin), and their sulfate metabolites with serum albumin, cytochrome P450 (CYP2C9, 2C19, and 3A4) enzymes, and organic anion-transporting polypeptides (OATP1B1 and OATP2B1). *Pharmacology Research and Perspectives*, 12(5), Article e70021. <https://doi.org/10.1002/prp2.70021>
69. Pluta, R., Januszewski, S., Czuczwar, S. J. (2021). Myricetin as a promising molecule for the treatment of post-ischemic brain neurodegeneration. *Nutrients*, 13(2), Article 342. <https://doi.org/10.3390/nu13020342>
70. Wang, X., Sun, Y., Li, P., Wu, Z., Chen, Y., Fu, Y. et al. (2023). The protective effects of myricetin against acute liver failure via inhibiting inflammation and regulating oxidative stress via Nrf2 signaling. *Natural Product Research*, 37(5), 798–802. <https://doi.org/10.1080/14786419.2022.2089138>
71. Chomphen, L., Yamanont, P., Morales, N. P. (2024). Flavonoid metabolites in serum and urine after the ingestion of selected tropical fruits. *Nutrients*, 16(1), Article 161. <https://doi.org/10.3390/nu16010161>
72. Li, H., Li, H., Jiang, S., Xu, J., Cui, Y., Wang, H. et al. (2022). Study of the metabolism of myricetin in rat urine, plasma and feces by ultra-high-performance liquid chromatography. *Biomedical Chromatography*, 36(3), Article e5281. <https://doi.org/10.1002/bmc.5281>
73. Babotá, M., Frumuzachi, O., Tanase, C., Mocan, A. (2024). Efficacy of myricetin supplementation on glucose and lipid metabolism: A systematic review and meta-analysis of in vivo mice studies. *Nutrients*, 16(21), Article 3730. <https://doi.org/10.3390/nu16213730>
74. Narkhede, M., Adhao, V. S., Chinchole, P. P., Shejoi, V. M., Titare, A. G. (2025). A review on myricetin and its pharmacological activities. *International Journal of Biology Pharmacy and Allied Sciences*, 14(5), 1489–1513. <https://doi.org/10.31032/IJBPAS/2025/14.3.8788>
75. Mierziak, J., Kostyn, K., Kulma, A. (2014). Flavonoids as important molecules of plant interactions with the environment. *Molecules*, 19(10), 16240–16265. <https://doi.org/10.3390/molecules191016240>
76. Chen, S., Zhang, F., da Silva, A. P. G., Simal-Gandara, J., Cao, H. (2025). Vitamin C prevents myricetin degradation in boiling water by reducing ortho-quinone intermediates. *Food Chemistry*, 481, Article 143926. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143926>
77. Hasnat, H., Shompa, S. A., Islam, M. M., Alam, S., Richi, F. T., Emon, N. U. et al. (2024). Flavonoids: A treasure house of prospective pharmacological potentials. *Heliyon*, 10(6), Article e27533. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27533>
78. Xiong, H. -H., Lin, S. -Y., Chen, L. -L., Ouyang, K. -H., Wang, W. -J. (2023). The interaction between flavonoids and intestinal microbes: A review. *Foods*, 12(2), Article 320. <https://doi.org/10.3390/foods12020320>
79. Xia, S. -F., Le, G. -W., Wang, P., Qiu, Y. -Y., Tang, X. (2016). Regressive effect of myricetin on hepatic steatosis in mice fed a high-fat diet. *Nutrients*, 8(12), Article 799. <https://doi.org/10.3390/nu8120799>
80. Przybylski, T., Czerniel, J., Dobrosielski, J., Stawny, M. (2025). Flavonol technology: From the compounds' chemistry to clinical research. *Molecules*, 30(15), Article 3113. <https://doi.org/10.3390/molecules30153113>
81. Guo, H., Chen, Y. F., Tang, Y., Qian, J. Q. (2020). Method for enhancing bioavailability of myricetin based on self-assembly of casein-myricetin nanomicelles. *IET Nanobiotechnology*, 14(3), 239–244. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2018.5431>
82. Park, H. -s., Seo, C. -S., Baek, E. B., Rho, J. -h., Won, Y. -s., Kwun, H. -j. (2021). Gastroprotective effect of myricetin on ethanol-induced acute gastric injury in rats. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021(1), Article 9968112. <https://doi.org/10.1155/2021/9968112>
83. Lin, T. -C., Yang, C. -Y., Wu, T. -H., Tseng, C. -H., Yen, F. -L. (2023). Myricetin nanofibers enhanced water solubility and skin penetration for increasing antioxidant and photoprotective activities. *Pharmaceutics*, 15(3), Article 906. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030906>
84. Syahputra, R. A., Dalimunthe, A., Utari, Z. D., Halim, P., Sukarno, M. A., Zainalabidin, S. et al. (2024). Nanotechnology and flavonoids: Current research and future perspectives on cardiovascular health. *Journal of Functional Foods*, 120, Article 106355. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106355>
85. Wu, L., Ran, L., Lang, H., Zhou, M., Yu, L., Yi, L. et al. (2019). Myricetin improves endurance capacity by inducing muscle fiber type conversion via miR-499. *Nutrition and Metabolism*, 16(1), Article 27. <https://doi.org/10.1186/s12986-019-0353-8>
86. Chen, H., Lin, H., Xie, S., Huang, B., Qian, Y., Chen, K. et al. (2019). Myricetin inhibits NLRP3 inflammasome activation via reduction of ROS-dependent ubiquitination of ASC and promotion of ROS-independent NLRP3 ubiquitination. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 365(1), 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2018.12.019>
87. Yang, W., Su, J., Li, M., Li, T., Wang, X., Zhao, M. et al. (2021). Myricetin induces autophagy and cell cycle arrest of HCC by inhibiting MARCH1-regulated Stat3 and p38 MAPK signaling pathways. *Frontiers in Pharmacology*, 12(1), Article 709526. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.709526>

88. Pizzino, G., Irrera, N., Cucinotta, M., Pallio, G., Mannino, F., Arcoraci, V. et al. (2017). Oxidative stress: Harms and benefits for human health. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017(1), Article 8416763. <https://doi.org/10.1155/2017/8416763>
89. Chong, Z. Z., Souayah, N. (2025). Oxidative stress: Pathological driver in chronic neurodegenerative diseases. *Antioxidants*, 14(6), Article 696. <https://doi.org/10.3390/antiox14060696>
90. Minocha, T., Birla, H., Obaid, A. A., Rai, V., Sushma, P., Shivamallu, C. et al. (2022). Flavonoids as promising neuroprotectants and their therapeutic potential against Alzheimer's disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2022(1), Article 6038996. <https://doi.org/10.1155/2022/6038996>
91. Tada, Y., Suzuki, J.-I. (2016). Oxidative stress and myocarditis. *Current Pharmaceutical Design*, 22(4), 450–471. <https://doi.org/10.2174/1381612822666151222160559>
92. Hirao, Y., Kobayashi, H., Mori, Y., Kato, S., Kawanishi, S., Murata, M. et al. (2025). Myricetin causes site-specific DNA damage via reactive oxygen species generation by redox interactions with copper ions. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 891, Article 503694. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2023.503694>
93. Chaudhary, P., Janmeda, P., Docea, A. O., Yeskalyeva, B., Razis, A. F. A., Modu, B. et al. (2025). Oxidative stress, free radicals and antioxidants: Potential cross-talk in the pathophysiology of human diseases. *Frontiers in Chemistry*, 11(1), Article 1158198. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1158198>
94. Yang, Z.-J., Wang, H.-R., Wang, Y.-L., Zhai, Z.-H., Wang, L.-W., Li, L. et al. (2019). Myricetin attenuated diabetes-associated kidney injuries and dysfunction via regulating nuclear factor (erythroid derived 2)-like 2 and nuclear factor- κ B signaling. *Frontiers in Pharmacology*, 10, Article 647. <https://doi.org/10.3389/fphar.2019.00647>
95. Li, W., Kong, A.-N. (2009). Molecular mechanisms of Nrf2-mediated antioxidant response. *Molecular Carcinogenesis*, 48(2), 91–104. <https://doi.org/10.1002/mc.20465>
96. Jomová, K., Raptová, R., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H., Nepovimova, E., Kuca, K., Valko, M. (2023). Reactive oxygen species, toxicity, oxidative stress, and antioxidants: Chronic diseases and aging. *Archives of Toxicology*, 97(10), 2499–2574. <https://doi.org/10.1007/s00204-023-03562-9>
97. Suraweera, T. L., Rupasinghe, H. P. V., Dellaire, G., Xu, Z. (2020). Regulation of Nrf2/ARE pathway by dietary flavonoids: A friend or foe for cancer management? *Antioxidants*, 9(10), Article 973. <https://doi.org/10.3390/antiox9100973>
98. Rosa, A. C., Corsi, D., Cavi, N., Bruni, N., Dosio, F. (2021). Superoxide dismutase administration: A review of proposed human uses. *Molecules*, 26(7), Article 1844. <https://doi.org/10.3390/molecules26071844>
99. Chobot, V., Hadacek, F., Bachmann, G., Weckwerth, W., Kubicek, L. (2020). In vitro evaluation of pro- and antioxidant effects of flavonoid triterpenes in comparison to myricetin. *Molecules*, 25(24), Article 5850. <https://doi.org/10.3390/molecules25245850>
100. Silva-Pinto, P. A., de Pontes, J. T. C., Aguilar-Morón, B., Canales, C. S. C., Pavan, F. R., Roque-Borda, C. A. (2025). Phytochemical insights into flavonoids in cancer: Mechanisms, therapeutic potential, and the case of quercetin. *Heliyon*, 11(4), Article e42682. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42682>
101. Yang, L., Li, X., Ni, L., Lin, Y. (2025). Treatment of endothelial cell dysfunction in atherosclerosis: A new perspective integrating traditional and modern approaches. *Frontiers in Physiology*, 16(1), Article 1555118. <https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1555118>
102. Gu, S.-C., Xie, Z.-G., Gu, M.-J., Wang, C.-D., Xu, L.-M., Gao, C. et al. (2024). Myricetin mitigates motor disturbance and decreases neuronal ferroptosis in a rat model of Parkinson's disease. *Scientific Reports*, 14(1), Article 15107. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62910-6>
103. Chen, L., Fan, T., Wang, M., Zhu, C.-Y., Feng, W.-Y., Li, Y. et al. (2024). Myricetin, a natural inhibitor of CD147, increases sensitivity of cisplatin in ovarian cancer. *Expert Opinion on Therapeutic Targets*, 28(1–2), 83–95. <https://doi.org/10.1080/14728222.2024.2306545>
104. Rea, I. M., Gibson, D. S., McGilligan, V., McNerlan, S. E., Alexander, H. D., Ross, O. A. (2018). Age and age-related diseases: Role of inflammation triggers and cytokines. *Frontiers in Immunology*, 9(1), Article 586. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.00586>
105. Liu, T., Zhang, L., Joo, D., Sun, S.-C. (2017). NF- κ B signaling in inflammation. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 2(1), Article e17023. <https://doi.org/10.1038/sigtrans.2017.25>
106. Wang, S.-J., Tong, Y., Lu, S., Yang, R., Liao, X., Xu, Y.-F. et al. (2010). Anti-inflammatory activity of myricetin isolated from *Myrica rubra* Sieb. et Zucc. leaves. *Planta Medica*, 76(14), 1492–1496. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1249780>
107. de Oliveira Azevedo, A., Campos, J. J., de Souza, G. G., de Carvalho Veloso, C., Duarte, I. D. G., Braga, F. C. et al. (2015). Antinociceptive and anti-inflammatory effects of myricetin 3-O- β -galactoside isolated from *Davilla elliptica*: Involvement of the nitric system. *Journal of Natural Medicines*, 69(4), 487–493. <https://doi.org/10.1007/s11418-015-0913-9>
108. Oh, J.-H., Karadeniz, F., Lee, J. I., Park, S. Y., Seo, Y., Kong, C.-S. (2020). Anticatabolic and anti-inflammatory effects of myricetin 3-O- β -D-galactopyranoside in UVA-irradiated dermal cells via repression of MAPK/AP-1 and activation of TGF β /Smad. *Molecules*, 25(6), Article 1331. <https://doi.org/10.3390/molecules25061331>
109. Mao, H., Zhao, X., Sun, S.-c. (2025). NF- κ B in inflammation and cancer. *Cellular and Molecular Immunology*, 22(8), 811–839. <https://doi.org/10.1038/s41423-025-01310-w>
110. Hunter, C. J., De Plaen, I. G. (2014). Inflammatory signaling in NEC: Role of NF- κ B, cytokines and other inflammatory mediators. *Pathophysiology*, 21(1), 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2013.11.010>
111. Hinz, M., Scheidereit, C. (2014). The I κ B kinase complex in NF- κ B regulation and beyond. *EMBO Reports*, 15(1), 46–61. <https://doi.org/10.1002/embr.201357983>
112. Yu, C., Wang, D., Yang, Z., Wang, T. (2022). Pharmacological effects of polyphenol phytochemicals on the intestinal inflammation via targeting TLR4/NF- κ B signaling pathway. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(13), Article 6959. <https://doi.org/10.3390/ijms23136959>
113. Hu, H., Hu, Z., Zhang, Y., Wan, H., Yin, Z., Li, L. et al. (2022). Myricetin inhibits pseudorabies virus infection through direct inactivation and activating host antiviral defense. *Frontiers in Microbiology*, 13(1), Article 985108. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.985108>
114. Ju, Z., Li, M., Xu, J., Howell, D. C., Li, Z., Chen, F.-E. (2022). Recent development on COX-2 inhibitors as promising anti-inflammatory agents: The past 10 years. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 12(6), 2790–2807. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2022.01.002>
115. Zarghi, A., Arfaei, S. (2011). Selective COX-2 inhibitors: A review of their structure-activity relationships. *Iranian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 10(4), 655–685.
116. Rosas-Martínez, M., Gutiérrez-Venegas, G. (2019). Myricetin inhibition of peptidoglycan-induced COX-2 expression in H9c2 cardiomyocytes. *Preventive Nutrition and Food Science*, 24(2), 202–209. <https://doi.org/10.3746/pnf.2019.24.2.202>
117. Kumar, H. P. P., Panda, P., Karunakar, P., Shiksha, K., Singh, L., Ramesh, N. et al. (2019). Potential cyclooxygenase (COX-2) enzyme inhibitors from *Myrica nagi* – from *in-silico* to *in-vitro* investigation. *Pharmacognosy Magazine*, 15(64), 280–287. https://doi.org/10.4103/pm.pm_56_19
118. Ysrafil, Y., Sapiun, Z., Slamet, N. S., Mohamad, F., Hartati, H., Damiti, S. A. et al. (2023). Anti-inflammatory activities of flavonoid derivatives. *ADMET and DMPK*, 11(3), 331–359. <https://doi.org/10.5599/admet.1918>
119. Cinelli, M. A., Do, H. T., Miley, G. P., Silverman, R. B. (2020). Inducible nitric oxide synthase: Regulation, structure, and inhibition. *Medicinal Research Reviews*, 40(1), 158–189. <https://doi.org/10.1002/med.21599>
120. Knott, A. B., Bossy-Wetzell, E. (2010). Impact of nitric oxide on metabolism in health and age-related disease. *Diabetes, Obesity and Metabolism*, 12 (Suppl. 2), 126–133. <https://doi.org/10.1111/j.1463-1326.2010.01267.x>
121. Cho, B. O., Yin, H. H., Park, S. H., Byun, E. B., Ha, H. Y., Jang, S. I. (2016). Anti-inflammatory activity of myricetin from *Diospyros lotus* through suppression of NF- κ B and STAT1 activation and Nrf2-mediated HO-1 induction in lipopolysaccharide-stimulated RAW264.7 macrophages. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 80(8), 1520–1530. <https://doi.org/10.1080/09168451.2016.1171697>
122. Jang, J.-H., Lee, S. H., Jung, K., Yoo, H., Park, G. (2020). Inhibitory effects of myricetin on lipopolysaccharide-induced neuroinflammation. *Brain Sciences*, 10(1), Article 32. <https://doi.org/10.3390/brainsci10010032>
123. Alfidaghi, A., Martin, S. S., Leucker, T. M., Michos, E. D., Blaha, M. J., Lowenstein, C. J. et al. (2020). Inflammation and cardiovascular disease: From mechanisms to therapeutics. *American Journal of Preventive Cardiology*, 4(1), Article 100130. <https://doi.org/10.1016/j.ajpc.2020.100130>
124. Gao, C., Jiang, J., Tan, Y., Chen, S. (2023). Microglia in neurodegenerative diseases: Mechanism and potential therapeutic targets. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 8(1), Article 359. <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01588-0>
125. Ginwala, R., Bhavsar, R., Chigbu, D. I., Jain, P., Khan, Z. K. (2019). Potential role of flavonoids in treating chronic inflammatory diseases with a special focus on the anti-inflammatory activity of apigenin. *Antioxidants*, 8(2), Article 35. <https://doi.org/10.3390/antiox8020035>
126. Ghilardi, S. J., O'Reilly, B. M., Sgro, A. E. (2020). Intracellular signaling dynamics and their role in coordinating tissue repair. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine*, 12(3), Article e1479. <https://doi.org/10.1002/wsbm.1479>
127. He, W.-J., Lv, C.-H., Chen, Z., Shi, M., Zeng, C.-X., Hou, D.-X. et al. (2023). The regulatory effect of phytochemicals on chronic diseases by targeting Nrf2-ARE signaling pathway. *Antioxidants*, 12(2), Article 236. <https://doi.org/10.3390/antiox12020236>
128. Han, S.-H., Lee, J.-H., Woo, J.-S., Jung, G. H., Jung, S.-H., Han, E.-J. et al. (2022). Myricetin induces apoptosis through the MAPK pathway and regulates JNK-mediated autophagy in SK-BR-3 cells. *International Journal of Molecular Medicine*, 49(4), Article 54. <https://doi.org/10.3892/ijmm.2022.5110>
129. Ma, Y.-T., Li, C., Shen, Y., You, W.-H., Han, M.-X., Mu, Y.-F. et al. (2025). Mechanisms of the JNK/p38 MAPK signaling pathway in drug resistance in ovarian cancer. *Frontiers in Oncology*, 15(1), Article 153352. <https://doi.org/10.3389/fonc.2025.153352>
130. Papaconstantinou, J. (2019). The role of signaling pathways of inflammation and oxidative stress in development of senescence and aging phenotypes in cardiovascular disease. *Cells*, 8(11), Article 1583. <https://doi.org/10.3390/cells8111583>
131. Ponte, L. G. S., Pavan, I. C. B., Mancini, M. C. S., da Silva, L. G. S., Morelli, A. P., Severino, M. B. et al. (2021). The hallmarks of flavonoids in cancer. *Molecules*, 26(7), Article 2029. <https://doi.org/10.3390/molecules26072029>
132. Lee, Y. S., Choi, E. M. (2010). Myricetin inhibits IL-1 β -induced inflammatory mediators in SW982 human synovial sarcoma cells. *International Immunopharmacology*, 10(7), 812–814. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2010.04.010>
133. Moghadam, S. E., Ebrahimi, S. N., Salehi, P., Farimani, M. M., Hamburger, M., Jabbarzadeh, E. (2017). Wound healing potential of chlorogenic acid and myricetin-3-O- β -rhamnoside isolated from *Parrotia persica*. *Molecules*, 22(9), Article 1501. <https://doi.org/10.3390/molecules22091501>
134. Karar, J., Maity, A. (2011). PI3K/AKT/mTOR pathway in angiogenesis. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 4(1), Article 51. <https://doi.org/10.3389/fnmol.2011.00051>
135. Hashemi, M., Khosroshahi, E. M., Asadi, S., Tanha, M., Mohseni, F. G., Sagha, R. A. M. et al. (2025). Emerging roles of non-coding RNAs in modulating the PI3K/Akt pathway in cancer. *Non-coding RNA Research*, 10(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ncrna.2024.08.002>
136. Kwon, M., Jung, H. J. (2025). Anticancer potential of myricetin against Huh7 and Hep3B-derived liver cancer stem cells through the regulation of apoptosis, autophagy, and stemness. *Biomolecules and Therapeutics*, 33(4), 636–651. <https://doi.org/10.4062/biomolther.2025.044>
137. Zhou, M., Konigsberg, W. H., Hao, C., Pan, Y., Sun, J., Wang, X. (2023). Bioactivity and mechanisms of flavonoids in decreasing insulin resistance. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 38(1), 2199168. <https://doi.org/10.1080/14756366.2023.2199168>

138. Hardie, D. G., Ross, F. A., Hawley, S. A. (2012). AMPK: A nutrient and energy sensor that maintains energy homeostasis. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 13(4), 251–262. <https://doi.org/10.1038/nrm3311>
139. Kjøbsted, R., Hingst, J. R., Fentz, J., Foretz, M., Sanz, M. N., Pehmøller, C. et al. (2018). AMPK in skeletal muscle function and metabolism. *The FASEB Journal*, 32(4), 1741–1777. <https://doi.org/10.1096/fj.201700442R>
140. Moon, D. O. (2024). Plant-derived flavonoids as AMPK activators: Unveiling their potential in type 2 diabetes management through mechanistic insights, docking studies, and pharmacokinetics. *Applied Sciences*, 14(19), Article 8607. <https://doi.org/10.3390/app14198607>
141. Fang, C., Pan, J., Qu, N., Lei, Y., Han, J., Zhang, J. et al. (2022). The AMPK pathway in fatty liver disease. *Frontiers in Physiology*, 13(1), Article 970292. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.970292>
142. Xie, Y., Wang, Y., Xiang, W., Wang, Q., Cao, Y. (2020). Molecular mechanisms of the action of myricetin in cancer. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 20(2), 123–133. <https://doi.org/10.2174/1589557519666191018112756>
143. Kim, M., Tian, R. (2011). Targeting AMPK for cardiac protection: Opportunities and challenges. *Journal of Molecular and Cellular Cardiology*, 51(4), 548–553. <https://doi.org/10.1016/j.jmcc.2010.12.004>
144. Long, Y. C., Zierath, J. R. (2006). AMP-activated protein kinase signaling in metabolic regulation. *Journal of Clinical Investigation*, 116(7), 1776–1783. <https://doi.org/10.1172/jci29044>
145. Handy, D. E., Castro, R., Loscalzo, J. (2011). Epigenetic modifications: Basic mechanisms and role in cardiovascular disease. *Circulation*, 123(19), 2145–2156. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.110.956839>
146. Kubatka, P., Mazurakova, A., Samec, M., Koklesova, L., Zhai, K., Al-Ishaq, R. K. et al. (2021). Flavonoids against non-physiologic inflammation attributed to cancer initiation, development, and progression – 3PM pathways. *EPMA Journal*, 12(4), 559–587. <https://doi.org/10.1007/s13167-021-00257-y>
147. Su, L.-J., Mahabir, S., Ellison, G. L., McGuinn, L. A., Reid, B. C. (2012). Epigenetic contributions to the relationship between cancer and dietary intake of nutrients, bioactive food components, and environmental toxicants. *Frontiers in Genetics*, 2(1), Article 91. <https://doi.org/10.3389/fgene.2011.00091>
148. Meeran, S. M., Ahmed, A., Tollefsbol, T. O. (2010). Epigenetic targets of bioactive dietary components for cancer prevention and therapy. *Clinical Epigenetics*, 1, 101–116. <https://doi.org/10.1007/s13148-010-0011-5>
149. Takahashi, N., Yamaguchi, S., Ohtsuka, R., Takeda, M., Yoshida, T., Kosaka, T. et al. (2023). Gene expression analysis of antioxidant and DNA methylation on the rat liver after 4-week wood preservative chromated copper arsenate exposure. *Journal of Toxicologic Pathology*, 36(1), 31–43. <https://doi.org/10.1293/tox.2022-0093>
150. Esmaeili, M., Blythe, S. A., Tobias, J. W., Zhang, K., Yang, J., Klein, P. S. (2020). Chromatin accessibility and histone acetylation in the regulation of competence in early development. *Developmental Biology*, 462(1), 20–35. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2020.02.013>
151. Busch, C., Burkard, M., Leischner, C., Lauer, U. M., Frank, J., Venturelli, S. (2015). Epigenetic activities of flavonoids in the prevention and treatment of cancer. *Clinical Epigenetics*, 7(1), Article 64. <https://doi.org/10.1186/s13148-015-0095-z>
152. Eckschlager, T., Plich, J., Stiborova, M., Hrabeta, J. (2017). Histone deacetylase inhibitors as anticancer drugs. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(7), Article 1414. <https://doi.org/10.3390/ijms18071414>
153. Stachecka, J., Kolodziejcki, P. A., Noak, M., Szczerbal, I. (2021). Alteration of active and repressive histone marks during adipogenic differentiation of porcine mesenchymal stem cells. *Scientific Reports*, 11(1), Article 1325. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79584-x>
154. Prananda, A. T., Halim, P., Syahputra, R. A. (2025). Targeting miRNA with flavonoids: Unlocking novel pathways in cardiovascular disease management. *Frontiers in Pharmacology*, 16(1), Article 1532986. <https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1532986>
155. Giuppi, M., La Salvia, A., Evangelista, J., Ghidini, M. (2021). The role and expression of angiogenesis-related miRNAs in gastric cancer. *Biology*, 10(2), Article 146. <https://doi.org/10.3390/biology10020146>
156. Mioc, M., Prodea, A., Racoviceanu, R., Mioc, A., Ghiulai, R., Milan, A. et al. (2022). Recent advances regarding the molecular mechanisms of triterpenic acids: A review (Part II). *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16), Article 8896. <https://doi.org/10.3390/ijms23147740>
157. Statello, L., Guo, C.-J., Chen, L.-L., Huarte, M. (2021). Gene regulation by long non-coding RNAs and its biological functions. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 22(2), 96–118. <https://doi.org/10.1038/s41580-020-00315-9>
158. Loboda, A., Damulewicz, M., Pyza, E., Jozkowicz, A., Dulak, J. (2016). Role of Nrf2/HO-1 system in development, oxidative stress response and diseases: An evolutionarily conserved mechanism. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 73(17), 3221–3247. <https://doi.org/10.1007/s00018-016-2223-0>
159. Masci, D., Puxeddu, M., Silvestri, R., La Regina, G. (2024). Targeting CBP and p300: Emerging anticancer agents. *Molecules*, 29(19), Article 4524. <https://doi.org/10.3390/molecules29194524>
160. Reed, S. M., Quelle, D. E. (2014). p53 acetylation: Regulation and consequences. *Cancers*, 7(1), 30–69. <https://doi.org/10.3390/cancers7010030>
161. Maissan, P., Mooij, E. J., Barberis, M. (2021). Sirtuins-mediated system-level regulation of mammalian tissues at the interface between metabolism and cell cycle: A systematic review. *Biology*, 10(3), Article 194. <https://doi.org/10.3390/biology10030194>
162. Asprițoiu, V. M., Stoica, I., Bleotu, C., Diaconu, C. C. (2021). Epigenetic regulation of angiogenesis in development and tumors progression: Potential implications for cancer treatment. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 9(1), Article 689962. <https://doi.org/10.3389/fcell.2021.689962>
163. Singh, S., Nagalakshmi, D., Sharma, K. K., Ravichandiran, V. (2021). Natural antioxidants for neuroinflammatory disorders and possible involvement of Nrf2 pathway: A review. *Heliyon*, 7(2), Article e06216. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06216>
164. Li, J., Xiang, H., Huang, C., Lu, J. (2021). Pharmacological actions of myricetin in the nervous system: A comprehensive review of preclinical studies in animals and cell models. *Frontiers in Pharmacology*, 12(1), Article 797298. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.797298>
165. Berköz, M., Yıldırım, M., Yalın, S., İlhan, M., Yunusoğlu, O. (2020). Myricetin inhibits angiotensin converting enzyme and induces nitric oxide production in HUVEC cell line. *General Physiology and Biophysics*, 39(3), 249–258. <https://doi.org/10.4149/gpb.2020007>
166. Kim, G. D. (2017). Myricetin inhibits angiogenesis by inducing apoptosis and suppressing PI3K/Akt/mTOR signaling in endothelial cells. *Journal of Cancer Prevention*, 22(4), 219–227. <https://doi.org/10.15430/jcp.2017.22.4.219>
167. Niisato, N., Marunaka, Y. (2023). Therapeutic potential of multifunctional myricetin for treatment of type 2 diabetes mellitus. *Frontiers in Nutrition*, 10(1), Article 1175660. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1175660>
168. Al-Ishaq, R. K., Abotaleb, M., Kubatka, P., Kajo, K., Büsselberg, D. (2019). Flavonoids and their anti-diabetic effects: Cellular mechanisms and effects to improve blood sugar levels. *Biomolecules*, 9(9), Article 430. <https://doi.org/10.3390/biom9090430>
169. Kashtoh, H., Baek, K.-H. (2022). Recent updates on phytoconstituent alpha-glucosidase inhibitors: An approach towards the treatment of type two diabetes. *Plants*, 11(20), Article 2722. <https://doi.org/10.3390/plants11202722>
170. Yang, W., Yang, M., Tian, Y., Jiang, Q., Loo, J. J., Cao, J. et al. (2022). Effect of myricetin on lipid metabolism in primary calf hepatocytes challenged with long-chain fatty acids. *Metabolites*, 12(11), Article 1071. <https://doi.org/10.3390/metabo12111071>
171. Kang, K. A., Wang, Z. H., Zhang, R., Piao, M. J., Kim, K. C., Kang, S. S. et al. (2010). Myricetin protects cells against oxidative stress-induced apoptosis via regulation of PI3K/Akt and MAPK signaling pathways. *International Journal of Molecular Sciences*, 11(11), 4348–4360. <https://doi.org/10.3390/ijms11114348>
172. Kimura, A. M., Tsuji, M., Yasumoto, T., Mori, Y., Oguchi, T., Tsuji, Y. et al. (2021). Myricetin prevents high molecular weight β 1–42 oligomer-induced neurotoxicity through antioxidant effects in cell membranes and mitochondria. *Free Radical Biology and Medicine*, 171(1), 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2021.05.019>
173. Dhanraj, V., Karuppaiah, J., Balakrishnan, R., Elangovan, N. (2018). Myricetin attenuates neurodegeneration and cognitive impairment in Parkinsonism. *Frontiers in Bioscience – Elite*, 10(3), 481–494. <https://doi.org/10.2741/e835>
174. Feng, J., Chen, X., Wang, Y., Du, Y., Sun, Q., Zang, W. et al. (2015). Myricetin inhibits proliferation and induces apoptosis and cell cycle arrest in gastric cancer cells. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 408, 163–170. <https://doi.org/10.1007/s11010-015-2492-1>
175. Zhou, Z., Mao, W., Li, Y., Qi, C., He, Y. (2019). Myricetin inhibits breast tumor growth and angiogenesis by regulating VEGF/VEGFR2 and p38MAPK signaling pathways. *The Anatomical Record*, 302(12), 2186–2192. <https://doi.org/10.1002/ar.24222>
176. Mothlatlego, K. E., Abdalla, M. A., Leonard, C. M., Eloff, J. N., McGaw, L. J. (2020). Inhibitory effect of *Newtonia* extracts and myricetin 3-O- γ -hamnoside (myricitrin) on bacterial biofilm formation. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 20(1), Article 358. <https://doi.org/10.1186/s12906-020-03139-4>
177. Zhang, Z., Cao, M., Shang, Z., Xu, J., Chen, X., Zhu, Z. et al. (2025). Research progress on the antibacterial activity of natural flavonoids. *Antibiotics*, 14(4), Article 334. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14040334>
178. Zeng, D., Jiao, F., Yang, Y., Dou, S., Yu, J., Yu, X. et al. (2025). Myricetin potentiates antibiotics against resistant *Pseudomonas aeruginosa* by disrupting biofilm formation and inhibiting motility through FimX-mediated c-di-GMP signaling interference. *Biology*, 14(7), Article 859. <https://doi.org/10.3390/biology14070859>
179. Krzyżek, P., Migdał, P., Paluch, E., Karwańska, M., Wieliczko, A., Gościński, G. (2021). Myricetin as an antiviral compound interfering with a morphological transformation into coccoid forms and potentiating activity of antibiotics against *Helicobacter pylori*. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(5), Article 2695. <https://doi.org/10.3390/ijms22052695>
180. Carević, T., Kolarević, S., Kolarević, M. K., Nestorović, N., Novović, K., Nikolić, B. et al. (2024). Citrus flavonoids diosmin, myricetin and neohesperidin as inhibitors of *Pseudomonas aeruginosa*: Evidence from antibiofilm, gene expression and *in vivo* analysis. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 181(1), Article 117642. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2024.117642>
181. Šudomová, M., Hassan, S. T. S. (2023). Flavonoids with anti-herpes simplex virus properties: Deciphering their mechanisms in disrupting the viral life cycle. *Viruses*, 15(12), Article 2340. <https://doi.org/10.3390/v15122340>
182. Pan, H., He, J., Yang, Z., Yao, X., Zhang, H., Li, R. et al. (2023). Myricetin possesses the potency against SARS-CoV-2 infection through blocking viral-entry facilitators and suppressing inflammation in rats and mice. *Phytomedicine*, 116(1), Article 154858. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2023.154858>
183. Song, Y., Zhao, X., Chen, Y., Yu, X., Su, T., Wang, J. et al. (2024). The antiviral activity of myricetin against pseudorabies virus through regulation of the type I interferon signaling pathway. *Journal of Virology*, 99(1), Article e0156724. <https://doi.org/10.1128/jvi.01567-24>
184. Badshah, S. L., Faisal, S., Muhammad, A., Poulson, B. G., Emwas, A. H., Jaremko, M. (2021). Antiviral activities of flavonoids. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 140(1), Article 111596. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.111596>
185. Muñoz, A. L., Cuéllar, A. F., Arévalo, G., Santamaría, B. D., Rodríguez, A. K., Buendía-Atencio, C. et al. (2023). Antiviral activity of myricetin glycosylated compounds isolated from *Marattia taxifolia* against chikungunya virus. *EXCLI Journal*, 22, 716–731. <https://doi.org/10.17179/excli2023-6242>
186. Kocić-Tanackov, S., Dimić, G., Tanackov, I., Pejin, D., Mojić, L., Pejin, J. (2012). The inhibitory effect of oregano extract on the growth of *Aspergillus* spp. and on sterigmatocystin biosynthesis. *LWT*, 49(1), 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.04.013>
187. Meral, O. M., Aydin, M., Sumlu, E., Korucu, E. N., Ozturk, A. (2025). Myricetin exerts antibiofilm effects on *Candida albicans* by targeting the RAS1/cAMP/EFG1 pathway and disruption of the hyphal network. *Journal of Fungi*, 11(5), Article 398. <https://doi.org/10.3390/jof11050398>
188. Lee, H.-S., Kim, Y. (2022). Myricetin disturbs the cell wall integrity and increases the membrane permeability of *Candida albicans*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(1), 37–45. <https://doi.org/10.4014/jmb.2110.10014>

189. Hosee, Y. N., Farhan, M. S., Shaban, S. A. (2025). The potential of medicinal plants in antifungal drug development: Mechanisms, synergies, and future directions. *Journal of Mycology and Infection*, 30(1), 1–17. <https://doi.org/10.17966/JMI.2025.30.1.1>
190. Nowak-Perlak, M., Olszowy, M., Woźniak, M. (2025). The natural defense: Anti-aging potential of plant-derived substances and technological solutions against photoaging. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(16), Article 8061. <https://doi.org/10.3390/ijms26168061>
191. Kyselova, Z. (2011). Toxicological aspects of the use of phenolic compounds in disease prevention. *Interdisciplinary Toxicology*, 4(4), 173–183. <https://doi.org/10.2478/v10102-011-0027-5>
192. Bello, I., Bakkouri, A. S., Tabana, Y. M., Al-Hindi, B., Al-Mansoub, M. A., Mahmud, R. et al. (2016). Acute and sub-acute toxicity evaluation of the methanolic extract of *Alstonia scholaris* stem bark. *Medical Sciences*, 4(1), Article 4. <https://doi.org/10.3390/medsci4010004>
193. Alaryani, F. S. (2024). Myricetin ameliorates arsenic-induced hematological changes, immune dysfunction, oxidative stress, hepatic and renal injuries and promotes inflammatory genes in rats. *Open Veterinary Journal*, 14(7), 1677–1688. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2024.v14.i7.17>
194. Lai, Y., Xi, Y., Shao, M., Cui, X., Wei, X., Li, L. et al. (2020). Myricetin reduces the reproductive toxicity of cyclophosphamide in male mice. *Wei Sheng Yan Jiu*, 49(5), 790–794. <https://doi.org/10.19813/j.cnki.weishengyanjiu.2020.05.017> (In Chinese)
195. Hobbs, C. A., Swartz, C., Maronpot, R., Davis, J., Recio, L., Koyanagi, M. et al. (2015). Genotoxicity evaluation of the flavonoid, myricitrin, and its aglycone, myricetin. *Food and Chemical Toxicology*, 83(1), 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.06.016>
196. Nallappan, D., Ong, K. C., Palanisamy, U. D., Chua, K. H., Kuppusamy, U. R. (2021). Safety assessment and oxidative stress evaluation of myricetin derivative-rich fraction from *Syzygium malaccense* in C57BL/6J mice. *International Food Research Journal*, 28(4), 803–815. <https://doi.org/10.47836/ifrj.28.4.17>
197. Dorato, M. A., Engelhardt, J. A. (2005). The no-observed-adverse-effect-level in drug safety evaluations: Use, issues, and definition(s). *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 42(3), 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2005.05.004>
198. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2022). OECD Guidance Document No. 24: Acute Oral Toxicity – Up-and-Down Procedure (Test No. 425). OECD Publishing, 2022.
199. Aneeshkumar, A. L., Suja, S. N. R., Vilash, V., Nair, R. R., Siril, E. A., Rajasekharan, S. N. (2018). Sub-chronic oral toxicity assessment (90 days) of ethanolic fraction of leaves of *Neurocalyx calycinus* (R. Br. Ex Benn.) Rob. in rodents: A lesser known ethnomedicinal plant from the Cholanaikkan tribal community, India. *Interdisciplinary Toxicology*, 11(3), 221–235. <https://doi.org/10.2478/intox-2018-0021>
200. Setiani, L. A., Sari, B. L., Muntaza, W. (2023). Prediction of carcinogenic, mutagenic, hepatotoxic, and LD50 toxicity of herbs *Euphorbia hirta* and *Camellia sinensis* leaf compounds as in silico antihypertensive agents. *Journal of Research in Science Education*, 9(Special Issue), 103–112. <https://doi.org/10.29303/jp-pipa.v9iSpecialIssue.5900>
201. Nair, A. B., Jacob, S. (2016). A simple practice guide for dose conversion between animals and human. *Journal of Basic and Clinical Pharmacy*, 7(2), 27–31. <https://doi.org/10.4103/0976-0105.177703>
202. Batra, P., Sharma, A. K. (2013). Anti-cancer potential of flavonoids: Recent trends and future perspectives. *3 Biotech*, 3(6), 439–459. <https://doi.org/10.1007/s13205-013-0117-5>
203. Guo, Y. J., Zheng, S. L. (2014). Effect of myricetin on cytochrome P450 isoforms CYP1A2, CYP2C9 and CYP3A4 in rats. *Pharmazie*, 69(4), 306–310.
204. Lou, D., Bao, S. -s., Li, Y. -h., Lin, Q. -m., Yang, S. -f., He, J. -y. (2019). Inhibitory mechanisms of myricetin on human and rat liver cytochrome P450 enzymes. *European Journal of Drug Metabolism and Pharmacokinetics*, 44(5), 611–618. <https://doi.org/10.1007/s13318-019-00546-y>
205. Liu, L., Sun, S., Rui, H., Li, X. (2017). *In vitro* inhibitory effects of dihydromyricetin on human liver cytochrome P450 enzymes. *Pharmaceutical Biology*, 55(1), 1868–1874. <https://doi.org/10.1080/13880209.2017.1339284>
206. Bhatt, S., Manhas, D., Kumar, V., Gour, A., Sharma, K., Dogra, A. et al. (2022). Effect of myricetin on CYP2C8 inhibition to assess the likelihood of drug interaction using *in silico*, *in vitro*, and *in vivo* approaches. *ACS Omega*, 7(15), 13260–13269. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00726>
207. Choi, S. -J., Shin, S. -C., Choi, J. -S. (2011). Effects of myricetin on the bioavailability of doxorubicin for oral drug delivery in rats: Possible role of CYP3A4 and P-glycoprotein inhibition by myricetin. *Archives of Pharmacological Research*, 34(2), 309–315. <https://doi.org/10.1007/s12272-011-0217-x>
208. Ali, A., Memon, Z., Hameed, A., Ul-Haq, Z., Ali, M., Hafizur, R. M. (2025). Myricetin amplifies glucose-stimulated insulin secretion via the cAMP-PKA-Epac-2 signaling cascade. *Biomedicines*, 13(6), Article 1447. <https://doi.org/10.3390/biomedicines13061447>
209. Barnes, G. D. (2020). Combining antiplatelet and anticoagulant therapy in cardiovascular disease. *Hematology — American Society of Hematology Education Program*, 2020(1), 642–648. <https://doi.org/10.1182/hematology.2020000151>
210. Zhang, X. H., Ma, Z. G., Rowlands, D. K., Gou, Y. L., Fok, K. L., Wong, H. Y. et al. (2012). Flavonoid myricetin modulates GABA(A) receptor activity through activation of Ca²⁺ channels and CaMK-II pathway. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2012(1), Article 758097. <https://doi.org/10.1155/2012/758097>
211. Qian, J., Meng, H., Xin, L., Xia, M., Shen, H., Li, G. et al. (2017). Self-nanomeulsifying drug delivery systems of myricetin: Formulation development, characterization, and *in vitro* and *in vivo* evaluation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 160(1), 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.09.020>
212. Lu, H., Zhang, S., Wang, J., Chen, Q. (2021). A review on polymer and lipid-based nanocarriers and its application to nano-pharmaceutical and food-based systems. *Frontiers in Nutrition*, 8(1), Article 783831. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.783831>
213. Coşkun, N., Sarıtaş, S., Bechelany, M., Karav, S. (2025). Polyphenols in foods and their use in the food industry: Enhancing the quality and nutritional value of functional foods. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(12), Article 5803. <https://doi.org/10.3390/ijms26125803>
214. Pluta, R., Januszewski, S., Czuczwar, S. J. (2021). Myricetin as a promising molecule for the treatment of post-ischemic brain neurodegeneration. *Nutrients*, 13(2), Article 342. <https://doi.org/10.3390/nu13020342>
215. Kurniawan, M. A., Suwanti, L. T., Mufasirin, M., Suprihati, E., Hastutie, P., Kusnoto, K. et al. (2025). Morphometric and molecular identification of *Eimeria bovis* and *Eimeria zuernii* on beef cattle in Lamongan, East Java, Indonesia. *Jurnal Medik Veteriner*, 8(1), 153–166. <https://doi.org/10.20473/jmv.vol8.iss1.2025.153-166>

AUTHOR INFORMATION

Affiliation

Bima P. Pratama, PhD in Post-harvest Technology, Researcher, Research Center for Agroindustry, National Research and Innovation Agency (BRIN) Jl. Raya Serpong, South Tangerang, Banten, West Java, 15310, Indonesia
E-mail: bimaputra.pratama@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3068-8718>

Aswin R. Khairullah, PhD in Veterinary Science, Researcher, Research Center for Veterinary Science, National Research and Innovation Agency (BRIN) Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia
E-mail: aswinraff@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9421-9342>

Ilma F. Ma'ruf, PhD in Chemistry, Researcher, Research Center for Pharmaceutical Ingredients and Traditional Medicine, National Research and Innovation Agency (BRIN) Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia
E-mail: ilma005@brin.go.id
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9641-8222>

Dea A. A. Kurniasih, PhD, Researcher, Research Center for Public Health and Nutrition, National Research and Innovation Agency (BRIN) Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia
E-mail: deaariani@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6159-0652>

Mohammad Sukmanadi, PhD, Assistant Professor, Division of Basic Veterinary Medicine, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, 60115, Indonesia
E-mail: moh-s@fkh.unair.ac.id
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7697-3667>
* corresponding author

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Принадлежность к организации

Бима П. Пратама, PhD в области послеуборочных технологий, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр агропромышленности, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN) Джалан Рая Серпонг, Южный Тангеранг, Banten, Западная Ява, 15310, Индонезия
E-mail: bimaputra.pratama@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3068-8718>

Асвин Р. Хайрулла, PhD в области ветеринарных наук, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр ветеринарных наук, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN) 16911, Индонезия, Западная Ява, Богор, Джалан Рая Богор 46 км
E-mail: aswinraff@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9421-9342>

Ильма Фаузия Маруф, PhD в области химических наук, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр фармацевтических ингредиентов и традиционной медицины, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN) 16911, Индонезия, Западная Ява, Богор, Джалан Рая Богор 46 км
E-mail: ilma005@brin.go.id
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9641-8222>

Деа А. А. Курниасих, PhD, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр общественного здравоохранения и питания, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN) 16911, Индонезия, Западная Ява, Богор, Джалан Рая Богор 46 км
E-mail: deaariani@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6159-0652>

Мохаммад Сукманеди, PhD, доцент, кафедра фундаментальной ветеринарной медицины, факультет ветеринарной медицины Университета Эйрлангга 60115, Индонезия, Восточная Ява, Сурабая, округ Мулиорехо, Джалан Эйрлангга, кампус С
E-mail: moh-s@fkh.unair.ac.id
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7697-3667>
* автор для контактов

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	Принадлежность к организации
<p>Imam Mustofa, PhD in Veterinary Reproduction, Professor, Division of Veterinary Reproduction, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga, Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, 60115, Indonesia E-mail: imam.mustofa@fkh.unair.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4543-1659</p>	<p>Имам Мустофа, PhD в области ветеринарной репродукции, профессор, Кафедра ветеринарной репродукции, Факультет ветеринарной медицины, Университет Эйрлангга 60115, Индонезия, Восточная Ява, Сурабая, округ Мулиорехо, Джалан Эйрлангга, кампус С E-mail: imam.mustofa@fkh.unair.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4543-1659</p>
<p>Adeyinka O. Akintunde, PhD, Assistant Professor, Department of Agriculture and Industrial Technology, Babcock University Ilishan-Remo 121103, Ogun State, Nigeria E-mail: adeyinka.akintunde@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6013-0902</p>	<p>Adeyinka O. Akintunde, PhD, доцент, кафедра сельского хозяйства и промышленных технологий, Университет Бабкок Илишан-Ремо 121103, штат Огун, Нигерия E-mail: adeyinka.akintunde@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6013-0902</p>
<p>Riza Z. Ahmad, PhD, Researcher, Research Center for Veterinary Science, National Research and Innovation Agency (BRIN) Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia E-mail: riza011@brin.go.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2067-717X</p>	<p>Риза З. Ахмад, PhD, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр ветеринарных наук, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN) 16911, Индонезия, Западная Ява, Богор, Джалан Рая Богор 46 км E-mail: riza011@brin.go.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2067-717X</p>
<p>Annise Proboningrat, PhD, Assistant Professor, Division of Veterinary Pathology, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, 60115, Indonesia E-mail: annise.drh@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7939-9402</p>	<p>Аннис Пробонинграт, PhD, доцент, кафедра ветеринарной патологии, факультет ветеринарной медицины, Университет Эйрлангга 60115, Индонезия, Восточная Ява, Сурабая, округ Мулиорехо, Джалан Эйрлангга, кампус С E-mail: annise.drh@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7939-9402</p>
<p>Bantari W. K. Wardhani, PhD, Researcher, Research Center for Pharmaceutical Ingredients and Traditional Medicine, National Research and Innovation Agency (BRIN) Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia E-mail: bantariwisynu@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7376-6187</p>	<p>Бантари В. К. Вардхани, PhD, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр фармацевтических ингредиентов и традиционной медицины, Национальное агентство исследований и инноваций (BRIN) 16911, Индонезия, Западная Ява, Богор, Джалан Рая Богор 46 км E-mail: bantariwisynu@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7376-6187</p>
<p>Angel J. B. Yuri, Doctor of Medicine, Veterinary Practitioner, Profession Program of Veterinary Medicine, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, 60115, Indonesia E-mail: angeljbyuri@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5867-4646</p>	<p>Анхель Дж. Б. Юрий, доктор медицинских наук, практикующий ветеринарный врач, профессиональная программа ветеринарной медицины, факультет ветеринарной медицины, Университет Эйрлангга 60115, Индонезия, Восточная Ява, Сурабая, округ Мулиорехо, Джалан Эйрлангга, кампус С E-mail: angeljbyuri@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5867-4646</p>
<p>Lulum Leliana, PhD, Assistant Professor, Department of Food and Agricultural Product Technology, Faculty of Agricultural Technology, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, 55281, Indonesia E-mail: lulum.leliana@ugm.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0700-7198</p>	<p>Лулум Лелиана, PhD, доцент, кафедра технологии пищевых продуктов и сельскохозяйственной продукции, факультет сельскохозяйственных технологий, Университет Гаджа Мада Джокаркарта, 55281, Индонезия E-mail: lulum.leliana@ugm.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0700-7198</p>
<p>Arif N. M. Ansori, PhD in Veterinary Science, Researcher, Postgraduate School, Universitas Airlangga Kampus B Dharmawangsa, Surabaya, East Java, 60286, Indonesia Uttaranchal Institute of Pharmaceutical Sciences, Uttaranchal University Uttarakhand, 248007, India Medical Biotechnology Research Group, Virtual Research Center for Bioinformatics and Biotechnology Surabaya, East Java, 60493, Indonesia E-mail: ansori.anm@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1279-3904</p>	<p>Ариф Нур Мухаммад Ансори, PhD в области ветеринарных наук, научный сотрудник, Департамент аспирантуры, Университет Эйрлангга кампус В Дхармавангса, Сурабая, Восточная Ява, 60286, Индонезия Уттаранчалский институт фармацевтических наук, Уттаранчалский университет Уттаракханд, 248007, Индия Группа исследований в области медицинской биотехнологии, Виртуальный исследовательский центр биоинформатики и биотехнологии Сурабая, Восточная Ява, 60493, Индонезия Электронная почта: ansori.anm@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1279-3904</p>
<p>Desi L. H. Utomo, Doctor of Medicine, Veterinary Practitioner, Profession Program of Veterinary Medicine, Faculty of Veterinary Medicine, Universitas Airlangga Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, 60115, Indonesia E-mail: Desilailatul361@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1401-9749</p>	<p>Дези Л. Х. Утомо, доктор медицинских наук, практикующий ветеринарный врач, профессиональная программа ветеринарной медицины, факультет ветеринарной медицины, Университет Эйрлангга 60115, Индонезия, Восточная Ява, Сурабая, округ Мулиорехо, Джалан Эйрлангга, кампус С E-mail: Desilailatul361@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1401-9749</p>
<p>Anggun K. Nikmah, Practitioner, Aquaculture Study Program, Faculty of Fisheries and Marine, Universitas Airlangga Kampus C Mulyorejo, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Surabaya, East Java, 60115, Indonesia E-mail: anggunkhoirun.ak@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6600-9479</p>	<p>Аннгун К. Никмах, практикант, программа обучения аквакультуре, факультет рыболовства и морского хозяйства, Университет Эйрлангга 60115, Индонезия, Восточная Ява, Сурабая, округ Мулиорехо, Джалан Эйрлангга, кампус С E-mail: anggunkhoirun.ak@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6600-9479</p>
<p>Wita Yulianti, PhD, Researcher, Research Center for Biota Systems, National Research and Innovation Agency (BRIN) Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, West Java, 16911, Indonesia E-mail: witaunand@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8138-8021</p>	<p>Вита Юлианти, PhD, научный сотрудник, Исследовательский центр биотных систем, Национальное агентство исследований и инноваций (БРИН) 16911, Индонезия, Западная Ява, Богор, Джалан Рая Богор 46 км E-mail: witaunand@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8138-8021</p>
Contribution	Критерии авторства
<p>Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.</p>	<p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.</p>
Conflict of interest	Конфликт интересов
<p>The authors declare no conflict of interest</p>	<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-78-85>

Поступила 16.11.2025

Поступила после рецензирования 05.03.2026

Принята в печать 11.03.2026

© Карлова Н. А., Паюрова Е. Н., Галактионова Е. А., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ПОТЕРИ В ЦЕПОЧКЕ ПОСТАВОК МОЛОКА В РОССИИ

Карлова Н. А., Паюрова Е. Н., Галактионова Е. А.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

потери молока,
продовольственная
цепочка,
продовольственная
безопасность,
экологическая
устойчивость

Несмотря на активизацию научных исследований в области продовольственных потерь и пищевых отходов (ПППО), понимание истинных масштабов потерь продовольствия, как в целом, так и по отдельным видам продукции, на каждом этапе от производства до потребления остается сложной и не до конца решенной задачей. Подчеркивая важность сокращения потерь, современные российские и зарубежные публикации в основном сосредоточены на выявлении способов их предотвращения, не уделяя должного внимания оценке совокупного объема потерянной продукции в производственно-сбытовой цепочке. Молочная промышленность РФ — стратегический сектор, обеспечивающий продовольственную безопасность, однако уровень самообеспеченности молоком пока ниже плановых показателей Доктрины продовольственной безопасности. Это создает потенциал для дальнейшего наращивания ресурсов молочной продукции, в том числе за счет сокращения потерь. Уже имеющиеся в литературе данные по оценкам потерь молока на различных этапах цепочки невозможно объединить из-за несопоставимости исследуемой номенклатуры молочной продукции, разных методологических подходов к оценке, различий в способах идентификации источников потерь и низкой степени достоверности исходной информации. В настоящей статье представлены результаты количественного измерения потерь молока и молочной продукции на этапах от сельхозпроизводства до поступления в розницу на основе разработанной авторами методики. Такой подход позволил выявить реальные масштабы потерь молока в России: физический объем в эквиваленте исходного сырья, экономическую стоимость потерь, а также в относительных величинах к общему объему ресурсов на каждом этапе цепочки поставок молока. Верификация полученных результатов указывает на их сопоставимость с оценками ФАО по миру и других научных исследований по отдельным странам. Кроме того, впервые для России представлена количественная оценка возможных эффектов от предотвращения потерь молока и молочной продукции с точки зрения повышения продовольственной безопасности, а также продемонстрировано, как сокращение потерь может способствовать решению различных экономических, социальных и экологических вопросов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Российский научный фонд (РНФ) грант № 24-28-01898, <https://rscf.ru/project/24-28-01898/>

Received 16.11.2025

Accepted in revised 05.03.2026

Accepted for publication 11.03.2026

© Karlova N. A., Payurova E. N., Galaktionova E. A., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

FOOD LOSSES IN THE MILK SUPPLY CHAIN IN RUSSIA

Natalia A. Karlova, Elena N. Payurova, Ekaterina A. Galaktionova*

National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

KEYWORDS:

milk losses,
food supply chain,
food security,
environmental
sustainability

ABSTRACT

Despite the increased research interest in the field of food loss and waste (FLW), understanding the true extent of food losses, both overall and by product type, remains a challenge at each stage from production to consumption. Emphasizing the importance of FLW reduction, current Russian and international studies focus mainly on identifying ways to prevent them, without paying due attention to assessing the total volume of lost products in the food supply chain. The dairy industry of the Russian Federation is a strategic sector that ensures food security, but the level of self-sufficiency in milk is still below the planned indicators of the Food Security Doctrine. This creates the potential for further increase in dairy resources, including by reducing losses. The data already available in literature on estimates of milk losses at different stages of the food supply chain cannot be aggregated due to the incomparability of the studied range of dairy products, different methodological approaches to assessment, differences in the methods of identifying sources of losses and low degree of reliability of the initial information. This paper presents the results of quantification of milk and dairy product losses at the stages from agricultural production up to retail, excluding the latter, based on the methodology developed by the authors. This approach made it possible to identify the real scale of milk losses in Russia: physical volume in the equivalent of raw materials, the economic cost of losses, as well as in relative values to the total volume of resources at each stage of the milk supply chain. Verification of the obtained results indicates their comparability with FAO estimates for the world and other scientific studies for individual countries. In addition, for the first time for Russia, this paper presents a quantitative assessment of the possible effects of preventing milk and dairy product losses from the point of view of improving food security, and demonstrates how reducing losses can contribute to solving various economic, social and environmental issues.

FUNDING: The research was carried out at the expense of grant No. 24-28-01898 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/24-28-01898/>

1. Введение

Первоочередной задачей при изучении проблемы продовольственных потерь и пищевых отходов (ПППО) во всем мире является их количественное измерение, при этом оценка ПППО осложняется в связи с отсутствием достоверной статистической информации

и особенностями дизайна производственно-сбытовых цепочек разных видов продукции. Несмотря на то, что в мировой практике исследования в отношении потерь и отходов пищевой продукции ведутся не один десяток лет, до сих пор существуют различия между странами в определениях и методах измерения.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Карлова, Н. А., Паюрова, Е. Н., Галактионова, Е. А. (2026). Потери в цепочке поставок молока в России. *Пищевые системы*, 9(1), 78–85. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-78-85>

FOR CITATION: Karlova, N. A., Payurova, E. N., Galaktionova, E. A. (2026). Food losses in the milk supply chain in Russia. *Food Systems*, 9(1), 78–85. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-78-85>

В Таблице 1 представлен обширный обзор научных публикаций на предмет: (1) методологических подходов к оценке потерь молока и молочной продукции, (2) идентификации источников их образования; (3) количественных оценок по потерям на разных этапах цепочки. Эта информация характеризует масштабы потерь молока в различных регионах и на отдельных этапах продовольственной цепочки, которые могут служить ориентиром для результатов, полученных для России.

Прежде всего, следует отметить публикацию [1], которая дала импульс другим исследованиям в области подсчета объемов ПППО. В самом докладе указано, что «из-за отсутствия достаточных сведений, в исследовании сделано много предположительных оценок относительно возможного уровня потерь продовольствия», и его авторы призывают к интерпретации результатов с большой осторожностью [1]. Однако выводы этого исследования стали основополагающими в обсуждении сокращения потерь и отходов продовольствия.

Часть работ по потерям молока имеет отношение к группам стран [1–3]. В них используется метод экстраполяции, при котором показатели потерь в целом по региону распространяются на отдельные страны, входящие в него. Однако страны одного и того же региона могут отличаться разнообразием производственно-сбытовых цепочек с точки зрения характеристик, процессов, этапов и участников. Такие исследования дают лишь приблизительные представления о масштабах потерь и не могут служить основой для разработки адресных мер политики. В этом контексте исследования о потерях на национальном уровне являются более репрезентативными. По молоку они ограничены узким перечнем стран: плохо сопоставимыми с Россией — Великобританией, Шотландией и Швецией [4–6] и более приближенными к России — Венгрией и Польшей [7,8]. Ряд работ посвящены России [9–11]. При этом некоторые из них акцентированы лишь на отдельные участки производственно-сбытовой цепочки.

Представленная Таблица 1 также хорошо демонстрирует различия в методах измерения потерь и используемых данных. Наиболее распространенный подход основан на балансовом методе, в основе которого лежат различные данные национальной или региональной статистики [1–3]. Зачастую используются экспертные оценки, которые сложно проверить и актуализировать с течением времени [4,9,12]. Наиболее точные оценки позволяют получить расчетный метод на основе наблюдаемых в статистике показателей предприятий [11]. Данные на уровне предприятий являются наиболее полезными для выявления критических точек потерь [5,7,10]. Крайне редко используется метод прямого измерения потерь, поскольку он сопряжен с высокими расходами [8,12]. Многообразие используемых методологических подходов затрудняет, а иногда даже делает невозможным сопоставление полученных результатов. Кроме того, отсутствует единообразие классификации источников потерь. Например, не все исследователи учитывают потенциальные потери молока, связанные с болезнями животных (маститом, заболеваниями конечностей) и их падежом, или возникающие на этапе переработки потери вторичных продуктов переработки молока — творожной или подсырной сыворотки, пахты [6,7,13].

Анализ имеющихся публикаций показывает широкий разброс оценок по объемам потерь молока для разных звеньев цепочки и регионов мира. Тем не менее, большинство из них указывают на то, что максимальный объем потерь и отходов достигается в процессе сельскохозяйственного производства и на этапе потребления (последний не входит в рамки исследования). Именно на эти сегменты следует ориентировать мероприятия по снижению объемов потерянной продукции.

В литературе практически отсутствует информация о потерях при транспортировке молочной продукции. Немногочисленные работы подтверждают, что доля потерь на этапе транспортировки незначительна по отношению к другим этапам цепочки [1,13].

Что касается России, то интерес к теме продовольственных потерь в стране возрастает, но исследования носят в основном теоретический, обзорный характер. Большинство из них находятся на этапе формирования понятийного аппарата [14]. Отраслевые специалисты, как правило, приводят источники потерь, однако недостаточно уделяют внимание измерению масштабов потерь [15]. Чаще всего отечественные исследователи оперируют данными и оценками ФАО и иностранных исследователей, ссылаясь на информацию Росстата о потерях из балансов ресурсов и использования по видам продукции либо цитируют исследование [9], которое основано на экспертных интервью, без попыток критического взгляда на эти данные. Достаточно редко в основе российских исследований лежат исходные данные на уровне предприятий [10,16]. Для расчета потерь используются действующие нормы расхода и потерь сырья, утвержденные

приказами соответствующих министерств и ведомств СССР^{1,2}. Актуальность использования в настоящее время норм расхода сырья с учетом потерь, разработанных в 80-х годах прошлого века, обоснована в работе [17]. Эти нормы используются по сей день предприятиями [10,18–24], а также для подготовки специалистов-технологов в молочной промышленности.

Исходя из выявленных ограниченных возможностей измерения потерь, целью нашего исследования является количественная оценка объема потерь молока и молочной продукции в России в различных звеньях производственно-сбытовой цепочки на основе разработанной авторами методики.

В ходе исследования решены следующие задачи:

- 1) проведен анализ имеющейся информационной базы для оценки потерь молока и молочной продукции в РФ, который проводился по трем направлениям источников: официальные данные государственных органов, данные предприятий и научные публикации, содержащие экономические расчеты потерь и экспертные оценки;
- 2) с учетом имеющейся информационной базы предложена методика оценки потерь молока в процессе сельскохозяйственного производства, переработки, хранения, транспортировки (отходы на конечных этапах цепочки — в торговле и потреблении домохозяйствами — в контур исследования не входят);
- 3) на основе предложенной методики выполнена количественная оценка потерь молока и молочной продукции в России, полученные результаты сопоставлены с имеющимися данными в российских и зарубежных публикациях;
- 4) рассмотрены некоторые аспекты внешних эффектов (экономических, социальных, экологических), связанных с потерями молока и молочной продукции.

2. Объекты и методы

Представленное исследование является продолжением работы авторов по оценке потерь продовольствия на этапах цепочки от сельхозпроизводства [11,25] до поставки в розницу [16], выполненной на доступных на тот момент данных 2021 г. Поэтому для сопоставимости с уже полученными ранее результатами в качестве базового периода для оценки потерь молока и молочной продукции, а также определения связанных с этим экономических, социальных, экологических эффектов, принимается также 2021 г. Основной объем потерь молока связан с уровнем технологий. В последние годы технологическое развитие производства и переработки сырого молока носит в основном инерционный характер. В условиях отсутствия каких-либо серьезных технологических сдвигов в отрасли в ближайшем будущем в связи с санкционным давлением и высокой зависимостью от импортных технологий есть все основания предполагать, что на среднесрочном горизонте показатели относительной нормы потерь в цепочке поставок молока существенно не изменятся.

2.1. Оценка потерь на этапе сельхозпроизводства

Количественная оценка потерь молока на данном этапе проводится расчетным методом на основе идентификации источников потерь (включая доубойные операции) и определения объемов потерянной продукции в физическом выражении. Такой подход отличается от других исследований по теме производственных потерь, которые чаще всего основываются на экспертных мнениях или частных оценках (погрешность таких оценок может быть высокой), либо строятся на расчете балансов продовольственных ресурсов и имеют ограничения с точки зрения охвата учитываемых видов потерь (подробный обзор исследований потерь молока на этапе производства представлен в [13]).

Основные причины возникновения потерь молока в России связаны с падежом коров и болезнями животных на молочных фермах, а также отбраковкой сырья на молокоперерабатывающих заводах. Источником данных для расчетов послужили формы отчетности о финансово-экономическом состоянии сельхозтоваропроизводителей, которые они регулярно представляют в Росстат и Минсельхоз России. Подробнее о методике в [11].

¹ Приказ Госагропрома СССР от 31.12.87 № 1025 «Об утверждении норм расхода и потерь сырья при производстве цельномолочной продукции на предприятиях молочной промышленности и организации работ по нормированию расхода сырья» Электронный ресурс <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=85777> Дата доступа 05.08.2025

² Приказ Минмясомолпрома СССР № 387, Минторга СССР № 345 от 29.12.1984 «Об утверждении норм расхода сырья при производстве мороженого» Электронный ресурс <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=41024>. Дата доступа 05.08.1925

Таблица 1. Оценки потерь молочной продукции в научной литературе*

Table 1. Assessment of dairy product losses in scientific literature

Этап цепочки	Место, период исследования	Методика	Оценки потерь	Источник
Все этапы цепочки	Весь мир, 2010–2011	Метод балансов продовольствия для каждого этапа цепочки на основе: — данных национальной и региональной статистики; — оценок, имеющихся в литературе; — экстраполяции	Для Европы, включая Россию — сельхозпроизводство: 3,5%, — послеуборочная обработка и хранение: 0,5%, — переработка: 1,2%, — распределение: 0,5%, — потребление: 7% от потоков молочной продукции на соответствующем этапе цепочки	[1]
Все этапы цепочки	Пакистан, 2014	Прямое наблюдение, интервью с фермерами, представителями розницы, потребителями и др.	Вся цепочка — 1,4% от валового производства молока, в т.ч. сельхозпроизводство — 0,6%	[12]
Все этапы цепочки	Европа-Центральная Азия (на примере Армении, Турции и Украины), 2009	Продовольственные балансы ФАО, данные официальной статистики, отраслевая информация, фокус-группы, интервью и опросы	Сельхозпроизводство — 4–20% в зависимости от уровня доходов страны, — послеуборочные операции и хранение: менее 2%, — переработка и упаковка: 1–5%, — распределение: 1–9%, — потребление: 1–7% от потоков молочной продукции на соответствующем этапе цепочки	[2]
Все этапы цепочки	Страны ЕС, 2011	Метод балансов продовольствия на основе статистических данных: — товарных балансов (СБС); — ФАО; — Евростата Prodcom	Вся цепочка — около 5% от валового производства молока, в т.ч.: — сельхозпроизводство: 0,5%, — переработка: 0,7%, — ритейл: 0,3%, — потребление: 3% от потоков молочной продукции на соответствующем этапе цепочки	[3]
Все этапы цепочки	Россия, 2019	Экспертная оценка	— Сельхозпроизводство: 10–50%, — транспортировка и переработка: 10–25%, логистика и хранение: 15%, — реализация: 5–10% от потоков молочной продукции на соответствующем этапе цепочки	[9]
Сельскохозяйственное производство	Шотландия, 2018	Опрос 45 молочных ферм. Частичный анализ жизненного цикла продукта	— 0,55% из-за остатков антибиотиков, — 0,5% при поступлении из доильного зала в инфраструктуру резервуара для хранения молока; — 0,09% забракковано переработчиком — доля от валового производства молока	[5]
Сельскохозяйственное производство	Швеция, 2020	Расчетный метод на основе статистических данных: — Шведского совета по сельскому хозяйству о производстве молока на шведских молокозаводах; — консультативной организации Växa Sverige (предоставляются самими фермерами, участвующими в консультативной программе Kokontrollen)	0,4% от валового производства молока (вкл. мастит и лечение коров антибиотиками)	[6]
Сельскохозяйственное производство	Россия, 2021	Расчетный метод на основе наблюдаемых в статистике показателей отчетности хозяйств	3,3% от валового производства молока	[11]
Переработка	Великобритания, 2017–2018	Экспертная оценка на основе обзора литературы	0,2% (не включая потери во время очистки, смены линий и отбраковки продукта) от объема производства молочной продукции	[4]
Переработка	Россия, 2019	Экспертная оценка Danone**	2–3% от объема производства цельномолочной продукции исследуемых предприятий	[9]
Переработка	Россия, 2020.	Интервью молочных заводов (6 предприятий в Кировской, Вологодской обл., Пермском крае)	1,3% от исходного сырья при производстве цельномолочной продукции исследуемых предприятий	[10]
Переработка	Венгрия, 2018–2019	Прямое наблюдение, анкетирование. Один молокозавод мощностью 140 тыс. литров перерабатываемого молока в день	0,9–1% от объемов входящего на переработку сырья	[8]
Транспортировка	Польша, 2015	Интервью молочных кооперативов (2 предприятия).	0,005% от объемов готовой молочной продукции	[7]
Ритейл (розничная торговля пищевыми продуктами)	Россия, 2021–2022	Расчет потерь пищевой продукции основан на данных бухгалтерской отчетности крупнейших торговых сетей РФ	3,03% общего товарооборота в ритейле без дегализации по видам продукции	[16]

* Составлено авторами.

** Данная оценка по цельномолочной продукции дает небольшой процент потерь, по мороженому она составляет 5%. При этом на заводах в разных регионах РФ в рамках одного холдинга есть размах по показателям потерь: от 0,5% в Поволжье до 3,68% в Центральном Черноземье. Это дополнительно обосновывает необходимость в подробных расчетах по переработке и применение коэффициентов, которые позволяют перевести всю продукцию в молочный эквивалент и уже потом выводить относительные величины потерь в %.

2.2. Оценка потерь на этапе переработки молока

В отличие от схемы определения потерь продукции на этапе сельхозпроизводства (суммированием абсолютных величин потерь по источникам их возникновения на основании отчетности хозяйств, публикуемых в официальной статистике) потери на этапе переработки определяются нормативным методом ввиду отсутствия возможности оценить их в натуральных величинах на основании отчетности перерабатывающих предприятий.

Источниками образования потерь в переработке являются потери сырья или готовой продукции во время осуществления технологического процесса (очистки и подготовки сырья к последующей переработке, прохождения продукции по трубопроводам или между цехами, упаковки и фасовки, хранения на складе, расхода сырья и готовой продукции на пробы).

Для разработки методики оценки потерь в процессе переработки молока используются действующие в России общепромышленные нормативы, разработанные профильными институтами на основании масштабных исследований [17–24], методические рекомендации для специалистов-технологов [18–24], а также доступные оценки конкретных молокоперерабатывающих предприятий, приведенные в научной публикации [10]. Для разработки методики оценки потерь в процессе переработки молока в настоящее время используются действующие в России нормы расхода и потерь сырья^{1,2}. На основании этих документов исследователями Фокиной Н. З. и Степановой Б. Н. разработаны рекомендации «Производственный учет и пересчет норм расхода сырья в показатели молока базисной жирности на предприятиях молочной промышленности». К сожалению, в открытой печати этого документа нет. Но основные его положения представлены в работах [18–24]. Расчет потерь производится по всей номенклатуре выпускаемой молочной продукции на основе данных Росстата по объемам производства молока и молочных продуктов в натуральном выражении. Потери в переработке зависят от вида производимой молочной продукции. Для их сопоставления необходимо применение коэффициентов, которые позволяют перевести готовую продукцию в молочный эквивалент для последующего получения относительной величины потерь в процентах от общего объема ресурсов молочной продукции на данном этапе цепочки. Для определения общих потерь в перерабатывающем звене полученные оценки потерь по видам продукции переводятся в молочный эквивалент и суммируются.

2.3. Оценка потерь на этапе распределения

Оценка потерь на этапе транспортировки и распределения проводилась нормативным методом на основе данных ФАО и других зарубежных исследований [1,2,7], оценки потерь молочной продукции в российской литературе отсутствуют. Причинами потерь могут стать нарушение упаковки, ошибки маркировки продукции, логистические сбои, нарушения в холодной цепи и прочее.

Норматив потерь на этапе транспортировки и распределения (принятый равным 0,5%) применяется к общему объему ресурсов молочной продукции на внутреннем рынке, который складывается из объема произведенной продукции и поступившей по импорту, за минусом экспорта молочных продуктов. Для оценки внутренних ресурсов молочной продукции в пересчете в основной вид продукции используются коэффициенты Росстата.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Физические объемы потерь

По расчетам авторов, потери молока в сельском хозяйстве составили 3,3% от общего объема произведенного в России молока сельхозорганизациями в 2021 г. [11]. В физическом выражении это оценивается примерно на уровне 600 тыс. тонн, что эквивалентно объему производства молока в российских регионах, отличающихся традиционно высокой интенсивностью ведения животноводства: Московская область, Ленинградская область, Республика Башкортостан, которые занимают 8–10 места в рейтинге ведущих регионов-производителей товарного молока в РФ в 2021 г.

Производство молочного сырья в РФ концентрировано — топ-30 компаний обеспечивают 16% всего произведенного молока. Если сопоставить расчетный объем потерь с объемами производства сырого молока крупнейшими в стране предприятиями, то потерянный объем сырья будет эквивалентен совокупному объему производства компаний, занимающих 2, 3 и 8 места в рейтинге производителей сырого молока в 2021 г. (Фирма «Агрокомплекс» им. Н. И. Ткачева, ГК «Русмолоко» (Olam International), ГК «Агропромкомплектация»)³, или

³ Рейтинг топ-30 производителей молока по валовому надою в 2021 году в тыс. т. Электронный ресурс <https://top.milknews.ru/milk-production#rating> Дата доступа 05.08.2025

практически половине достигнутых в 2021 г. объемов производства крупнейшего в России и в мире агрохолдинга «Эконива».

На этапе переработки теряется 4,7% от общего объема ресурсов входящего сырья на переработку (т.е. от 21 млн тонн сырого молока в 2021 г.). Это чуть больше 1 млн тонн в молочном эквиваленте (МЭ) (Таблица 2). Полученная оценка выше уровня, приведенного в научных исследованиях: 1,3% для цельномолочной продукции [8,10], диапазон 1–5% без указания видов или групп молочной продукции [2] (Таблица 1). Объясняется это тем, что она выполнена по всей номенклатуре выпускаемой молочной продукции, а не по отдельным видам или группам: цельномолочная продукция, сыры, мороженое и др., которые значительно отличаются по нормам потерь и весу в общем объеме производства в переработке молока. Наибольшие потери в физическом весе образуются при производстве цельномолочной продукции (питьевое молоко, кисломолочные продукты) (Таблица 2). Однако в пересчете на молоко потери при производстве молокоемких продуктов — сыров, творога — составляют 66% всех потерь в категории «молочная продукция».

Если продолжить аналогию сравнения потерь с объемами производства компаний-лидеров отрасли, то расчетный объем потерь на этапе переработки молочного сырья сопоставим с объемом выпуска молочной продукции российским подразделением транснационального гиганта PepsiCo (Вимм-Билль-Данн) или совокупным объемом производства молочных заводов, занимающих 2 и 3 места в рейтинге переработчиков на территории России в 2022 г. (Молвест, КОМОС ГРУПП)⁴.

Если сопоставить потерянный в переработке объем молочных продуктов (1 млн тонн в пересчете на МЭ) с объемом импорта молочной продукции в РФ в 2021 г. (6,5 млн тонн в МЭ), то это отношение составит 15%, т.е. внутренний рынок мог бы быть на 15% больше заполнен отечественной продукцией. Кроме того, весь объем российского экспорта молочной продукции в 2021 г. практически эквивалентен объемам потерь в переработке в пересчете на МЭ.

Потери на этапе распределения приняты за 0,5% от ресурсов внутреннего рынка молока и молочной продукции РФ или 136 тыс. тонн в МЭ.

В расчетах также учитывались потери вторичных продуктов — сыворотка в пересчете на компоненты исходного сырья (430 тыс. тонн.), которая не была направлена на дальнейшую переработку и утилизирована. Расчет сделан с использованием методики, приведенной в [26].

Суммарно потери в цепочке от сельхозпроизводства до поступления в розницу составляют около 2,2 млн тонн в пересчете на молоко или 8% от ресурсов внутреннего рынка молочных продуктов, которые с учетом потоков импорта сырья и готовой продукции и экспорта молочной продукции в 2021 г. составляли 27 млн тонн (Рисунок 1). Этот уровень превышает оценки потерь молока по всей цепочке в европейских странах — 5%, приведенные в исследованиях [2,3] (Таблица 1).

Если провести сопоставления с оценкой ФАО по потерям молочной продукции для Европы, включая Россию, то наши оценки потерь на этапе производства несколько ниже (3,3% [12], и 3,5% по данным ФАО [1]), при этом на этапе переработки наши расчеты по всей номенклатуре выпускаемой молочной продукции значительно превышают оценки ФАО (4,7% и 1,2% соответственно) (Таблица 1). Расхождения объясняются существенными различиями в методических подходах и используемой исходной информации.

3.2. Экономическая стоимость потерь

Стоимость потерянной молочной продукции и молочного сырья в продовольственной цепочке от производства до этапа поступления в розницу (не включая последний) в ценах производителей 2021 г. оценивается в 71 млрд руб. (почти 1 млрд долл.). Значительную долю в структуре потерь в стоимостном выражении занимают потери на этапе переработки (Рисунок 2), наибольший вклад в эту оценку вносят сыры и сырные продукты, творог — 64%, на цельномолочные продукты приходится 25%, мороженое — 6%.

В оценку стоимости потерянной молочной продукции включена экономическая стоимость вторичных продуктов. Вариантов использования молочной сыворотки несколько: реализация предприятием в сыром виде (например, как компонент в пищевой промышленности, медицине или на кормовые цели), а также переработка и производство напитков или сухой сыворотки. Каждый вариант альтернативного использования значительно отличается по добавленной

⁴ Рейтинг ТОП-100 переработчиков сырого молока в России за 2023 год. Электронный ресурс <https://www.ufamol.ru/upload/iblock/014/z6ci2pol3wu9nq4q7tg582bvd3a9e35x.pdf> Дата доступа 05.08.2025



Таблица 2. Потери молока на этапе переработки в России по данным 2021 г, тыс. тонн. в молочном эквиваленте (МЭ)¹
 Table 2. Milk losses at the processing stage in Russia according to data of 2021, thousand tons in milk equivalent (ME)

Виды молочной продукции	Объем пр-ва в 2021 г., тыс. тонн	Коеф. пере-вода в МЭ ²	Коеф. потерь, %	Потери в физ. весе, тыс. тонн	Потери в пересчете на МЭ, тыс. тонн
Цельномолочная продукция					169,0
Молоко жидкое обработанное, включая молоко для детского питания	5 684	1	1,51% ^{3,4}	87,1	87,1
Сливки	238	4	1,74% ⁵	4,2	16,9
Продукты кисломолочные (кроме творога и продуктов из творога)	2 736				
сметана	536	4	1,24% ^{4,6}	6,7	26,9
продукты кисломолочные (кроме сметаны)	2 196	1	1,70% ^{4,7}	38,0	38,0
продукты кисломолочные прочие	3	1	1,70% ^{4,7}	0,1	0,1
Масло	283	22,79	1,22% ^{3,8}	3,5	79,7
Сыры, сырные продукты, творог, творожные продукты					668,0
сыры всего	648	8,1–10,5	5,84% ⁹	40,0	324,2
сырные продукты	198	5,25	5,84% ⁹	12,2	64,2
творог	495	7	5,07% ^{3,10}	26,4	184,8
продукты на основе творога	207	7	6,18% ^{3,11}	13,6	94,9
Молоко и сливки сухие, сублимированные, в том числе цельные (СЦМ)	64	8,7	0,82% ³	0,5	4,6
Молоко сухое, сублимированное обезжиренное не более 1,5% жирности (СОМ)	96	11,2	3,40% ³	3,4	37,7
Сгущенное молоко	157	2,5	1,80% ³	2,9	7,2
Мороженое	527	3	2,40% ¹²	13,0	38,9
Всего					1005

¹ Расчеты авторов на основании данных Росстата.

² Методические указания по составлению балансов ресурсов и использования продуктов животноводства (мяса и мясопродуктов, молока и молокопродуктов, яиц и яйцопродуктов). Утверждены Приказом Росстата от 27.11.2023 № 605.

³ Приказ Госагропрома СССР от 31.12.87 № 1025 «Об утверждении норм расхода и потерь сырья при производстве цельномолочной продукции на предприятиях молочной промышленности и организации работ по нормированию расхода сырья».

⁴ [10], ⁵ [19], ⁶ [20], ⁷ [18], ⁸ [23], ⁹ [24], ¹⁰ [21], ¹¹ [22].

¹² Приказ Минмясомолпрома СССР N 387, Минторга СССР № 345 от 29.12.1984 «Об утверждении норм расхода сырья при производстве мороженого».

стоимости. В нашем расчете мы использовали минимальные цены дальнейшего использования — реализация предприятием сыворо- ки без дополнительной обработки, т.е. по минимальной стоимости.

3.3. Другие аспекты неэффективности потерь: бюджетная, социальная, экологическая

Если смотреть на проблему потерь продовольствия шире, то утрата части сырья и готовой продукции ведет не только к неэффективному использованию ресурсов и прямым экономическим потерям, но и связана с социальной, экологической, бюджетной неэффективностью.

В силу специфики отрасли молочного животноводства — высокой капиталоемкости, длительности производственного цикла, слабой

управляемости технологических процессов, а также недостаточной самообеспеченности РФ молоком (ниже установленных в стране целей), молочная отрасль признана приоритетной отраслью государственной поддержки. Объем средств, выделяемых на поддержку сельхозпроизводителей молочной специализации, составил в 2021 г. 47,5 млрд руб. (или больше 0,6 млрд долл.). Средства бюджета направляются на поддержку операционной деятельности, инвестиционной активности и развития племенной базы. В последние 10 лет, с 2014 по 2023 гг., ежегодные темпы развития сырьевого сектора молочной отрасли составляли 3%, что примерно соответствует нашим оценкам потерь сырого молока в 2021 г. В этой статье не проводятся

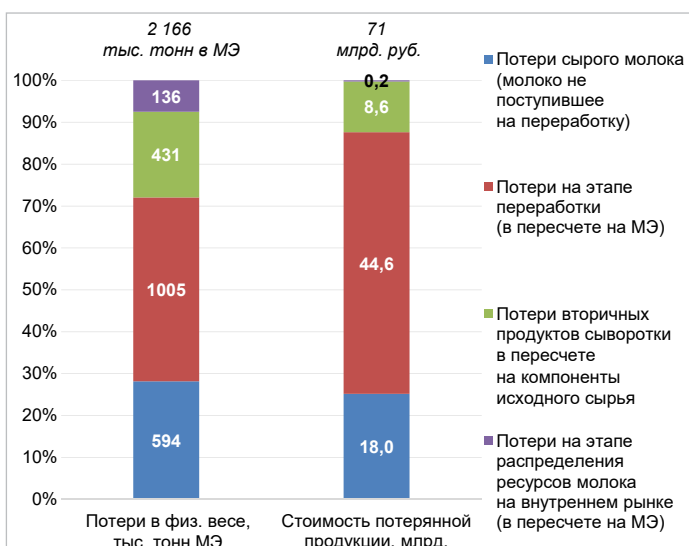


Рисунок 2. Структура потерь молока на этапах производства, переработки, логистики до поступления в розницу, в физическом и стоимостном выражении (по данным 2021 г.), тыс. тонн в молочном эквиваленте (МЭ) и млрд руб. (Расчеты авторов; [11])

Figure 2. Structure of milk losses at the stages of production, processing, logistics up to retail in physical and monetary terms (according to data of 2021), thousand tons in milk equivalent (ME) and billion rubles (authors' calculations; [11])

оценки стоимости мероприятий по сокращению потерь сырого молока. Однако сокращение потерь позволило бы значительно повысить эффективность расходования бюджетных средств как компенсирующего (субсидии на 1 литр реализованного молока, субсидии на корма в отдельные годы), так и стимулирующего характера (компенсация прямых затрат на создание и модернизацию объектов молочного животноводства, льготное кредитование и др.).

Предотвращая потери на этапах производства, переработки и распределения, обеспечивается дополнительный объем молочной продукции на внутреннем рынке, что позволило бы увеличить обеспеченность и потенциально потребление молочных продуктов на 4,8% (без учета сыровотки) — с 241 до 253 кг/на душу населения. С другой стороны, при неизменном уровне потребления дополнительный объем предотвращенных потерь молочной продукции мог бы обеспечить доступ к молоку дополнительно почти 7 млн человек (при прочих равных условиях — сохранения доходов населения, неизменности вкусовых предпочтений потребителей).

Если допустить, что внутреннее производство молочных продуктов увеличится на величину предотвращенных потерь, то уровень самообеспечения, который в 2021 г. составлял 84,3%, при том же объеме потребления и экспорта может увеличиться до 88,7%, т.е. приблизиться к определенному в Доктрине продовольственной безопасности РФ пороговому значению уровня самообеспечения по молоку и молокопродуктам в 90%.

В этой статье мы не предпринимаем попыток оценить влияние потерь в цепочке молока на экологические аспекты. Эта задача сложна, она включает оценку связанных с потерями молока:

- эмиссии парниковых газов (ПГ) на этапе производства, переработки и транспортировки;
- загрязнения сточных вод различными отходами переработки молока;
- потерь энергоресурсов в холодильной цепи и в логистике;
- последствий от утилизации упаковки невостребованных продуктов и других экстерналий.

В [27] представлена оценка эмиссии ПГ, связанной с потерями продукции на этапе сельхозпроизводства. Несмотря на незначительную долю потерь молока в общем объеме потерянной в сельском хозяйстве продукции (8%), они оказывают существенное воздействие на окружающую среду с точки зрения выбросов углекислого газа — на них приходится 27% общего углеродного следа от потерь или 570 тыс. тонн CO₂-эквив. по данным 2021 г. В других российских исследованиях влияние продовольственных потерь на выбросы парниковых газов не представлено. Однако, согласно оценке, представленной в первой базе данных глобальных выбросов ПГ EDGAR-FOOD [27], в общих выбросах продовольственной системы в России наибольший объем генерируют сельское хозяйство и земледель-

зование (62%), в том числе этапы производства и связанные с ним факторы — 38% от общего объема; 24% приходится на выбросы в секторе ЗИЗЛХ, связанные с сельскохозяйственным производством. Остальная часть выбросов связана с переработкой (5%) и деятельностью цепочки поставок: транспортировкой (7%), упаковкой (7%), розничной торговлей (4%), потреблением (3%), утилизацией отходов (12%).

Если отбросить продуктовые особенности и использовать результаты модели EDGAR-FOOD (пока единственной известной нам оценки по всей цепочке агропродовольственной системы РФ), то можно сделать вывод о важности сокращения потерь на этапе производства с точки зрения выбросов ПГ. Однако необходимо учитывать, что мероприятия по сокращению потерь могут приводить к еще большим затратам и загрязнению других сред (почвы, воды) [13].

Негативное влияние на экологию оказывает загрязнение сточных вод различными отходами переработки молока. По данным исследования одного из молочных заводов в РФ, объем сточных вод, образовавшихся при производстве молочной продукции, в 9 раз превышает объем производимой продукции [28]. Основной состав сточных вод — это израсходованная вода в процессе технологической промывки оборудования, а основными загрязняющими веществами являются органические соединения (белки и жиры). В [26] отмечается, что 1 т молочной сыровотки, сливаемой в канализацию, загрязняет водоемы так же, как 100 м³ хозяйственно-бытовых стоков. Молочная сыровотка является сильнодействующим органическим загрязнителем (4 класс опасности) с высокими значениями показателей биохимического потребления кислорода (БПК 40–60 г/л) и химической потребности в кислороде (ХПК 50–80 г/л), что существенно превышает предельно допустимое количество содержания органических соединений в сточных водах (БПК хозяйственно-бытовых сточных вод — 300 мг O₂/л, ХПК — 500 мг O₂/л). Недостаточная очистка сточных вод, залповые сбросы побочных продуктов переработки молока приводят к эвтрофикации гидросистем. Поэтому сокращение потерь молока на этапе переработки способно снизить затраты на очистку сточных вод и препятствовать загрязнению водных объектов.

Таким образом, потери на всей цепочке поставок молока обходятся дорого как для производителя и потребителя, так и для государства. Несмотря на незначительные относительные величины потерь молока и молочных продуктов на каждом этапе, меры по их сокращению могут оказать влияние на эффективность государственной поддержки молочного сектора, а также способствовать достижению целей продовольственной безопасности.

4. Выводы

В статье приводится количественная оценка потерь в цепочке поставок молока, которая дает представление о том, на каких этапах более эффективны усилия по их снижению. Для ответа на этот вопрос целесообразно опираться на подход к оценке полной стоимости пищевых потерь, разработанный ФАО. Он основывается на учете не только потерь экономической стоимости, но и связанных с ними экологических и социальных издержек, которые несут субъекты частного сектора и общество в целом.

Полученные авторами результаты показывают, что в цепочке поставок молока из общего объема потерь в физическом выражении 27% приходится на этап первичного производства, 46% — на переработку, потери вторичного сырья составляют 20%, потери на этапе распределения продукции — 6%. При этом упущенная экономическая ценность (экономическая стоимость потерь) формируется в основном на этапе переработки.

Общий эффект от сокращения потерь на всей цепочке (от производства до поступления в розницу) способствует достижению целей в области продовольственной безопасности и питания за счет увеличения потенциального потребления молочных продуктов почти на 5% в год или обеспечения молочной продукцией дополнительно 7 млн человек. Если же объем потребления не изменится, то уровень самообеспечения молоком и молокопродуктами в стране приблизится к целевым показателям Доктрины продовольственной безопасности РФ.

Снижение потерь молока создает положительные эффекты и в сфере экологической устойчивости. Если говорить об эмиссии парниковых газов, то наиболее важным является сокращение потерь на этапе сельхозпроизводства, где генерируется наибольший объем выбросов парниковых газов. Другой эффект связан с загрязнением сточных вод. Наибольшее загрязнение водных объектов в результате потерь продукции и сырья происходит на этапе переработки молока.

Таким образом, принятие мер по сокращению потерь на каждом этапе важно с позиции достижения экономических, социальных, экологических целей и учета интересов производителей, общества и государства. Продолжение исследований по оценке потерь на дру-

гих этапах цепочки — торговля, потребление, утилизация отходов — позволит провести комплексную оценку потенциальных выгод и издержек сокращения потерь пищевой продукции для заинтересованных сторон и общества в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. FAO (2011). Global food losses and food waste — Extent, causes and prevention. Rome, 2011.
2. Themen, D. (2014). Reduction of food losses and waste in Europe and Central Asia for improved food security and agrifood chain. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-au844e.pdf> Accessed June 19, 2025
3. Caldeira, C., De Laurentiis, V., Corrado, S., Van Holsteijn, F., Sala, S. (2019). Quantification of food waste per product group along the food supply chain in the European Union: A mass flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 479–488. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.011>
4. Fisher, K., Whittaker, D. (2018). Opportunities to reduce waste along the journey of milk, from dairy to home. Waste and Resources Action Programme; Final Report. UK, 2018.
5. March, M.D., Toma, L., Thompson, B., Haskell, M.J. (2019). Food waste in primary production: Milk loss with mitigation potentials. *Frontiers in Nutrition*, 6, Article 175. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00175>
6. Lindow, K. (2021). Food loss in Sweden. Methods for increased knowledge about losses and resources in food production. Retrieved from <https://webbutiken.jordbruksverket.se/en/artiklar/food-loss-in-sweden.html> Accessed August 5, 2025
7. Tomaszewska, M., Lipińska, M., Kolożyn-Krajewska D., Grodzicki, A. (2016). Analiza strat na etapie transportu mleka i jego przetworów w wybranych spółdzielniach mleczarskich z Wielkopolski. *Annals of the Polish Association of Agricultural and Agribusiness Economists*, 18(3), 352–357. [Tomaszewska, M., Lipińska, M., Kolożyn-Krajewska D., Grodzicki, A. (2016). Analysis of losses at the transport stage of milk and dairy in selected dairy cooperatives in Wielkopolska. *Annals of the Polish Association of Agricultural and Agribusiness Economists*, 18(3), 352–357. (In Polish)]
8. Tóth, K., Borbély, C., Nagy, B., Szabó-Szentgróti, G., Szabó-Szentgróti, E. (2021). Measurement of food losses in a Hungarian dairy processing plant. *Foods*, 10(2), Article 229. <https://doi.org/10.3390/foods10020229>
9. Московская школа управления «СКОЛКОВО» Центр развития потребительского рынка. (2019). «Продовольственные потери и органические отходы на потребительском рынке Российской Федерации», Москва, 2019. [Moscow School of Management SKOLKOVO. Center of consumer market development. (2019). “Food losses and organic waste on the consumer market of the Russian Federation”, Moscow, 2019. (In Russian)]
10. Забегалова, Г.Н., Новокшанова, А.Л., Баронов, В.И. (2020). Отчет по НИР «Разработка актуализированных коэффициентов пересчета молочной продукции в основной вид сельскохозяйственной продукции». Электронный ресурс <https://apknet.ru/koefficientov-perescheta-molochnoj-produkcii/> Дата доступа 19.06.2025 [Zabegalova, G.N., Nivokshanova, A.L., Baronov, V.I. (2020). Research and development program report “Development of the updated coefficients of conversion of dairy products into the main type of agricultural products”. Retrieved from <https://apknet.ru/koefficientov-perescheta-molochnoj-produkcii/> Accessed June 19, 2025 (In Russian)]
11. Карлова, Н.А., Паюрова, П.Н., Галактионова, Е.А. (2023). Оценка потерь продовольствия на этапе сельскохозяйственного производства в Российской Федерации. *Вопросы экономики*, 5, 91–105. [Karlova, N.A., Payurova, E.N., Galaktionova, E.A. (2023). Assessment of food losses at the stage of agricultural production in the Russian Federation. *Voprosy Ekonomiki*, 5, 91–105. (In Russian)] <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2023-5-91-105>
12. Charad, J., Lanctuit, H., Goodwin, L., Hanson, C., Leous, J.P., Robertson, K. et al. (2017). Nestlé dairy factories in Pakistan: Losses across the value chain. The Food Loss and Waste Protocol. Washington, DC, USA, 2017. Retrieved from http://www.flwprotocol.org/wp-content/uploads/2017/05/FLW_Standard_Case-Study_March-2017_NestlePakistan.pdf Accessed August 05, 2025
13. FAO (2019). The State of Food and Agriculture 2019: Moving Forward on Food Loss and Waste Reduction. Rome, 2019. Retrieved from <https://www.fao.org/3/CA6030ru/CA6030ru.pdf> Accessed August 05, 2025
14. Бутырин, В.В., Карapotkin, О.Г., Платоновский, Н.Г. (2022). Потери в агропродовольственной сфере России и возможности их снижения. *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*, 10, 16–24. [Butyrin, V.V., Karapotkin, O.G., Platonovskiy, N.G. (2022). Losses in the agro-food sector of Russia and the possibility of their reduction. *Economy of Agricultural and Processing Enterprises*, 10, 16–25. (In Russian)] <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2022-0-10-16-24>
15. Петрунина, И.В. (2023). Потери сырья и продуктов его переработки в животноводстве и мясной отрасли. *Все о мясе*, 1, 8–11. [Petrunina, I.V. (2023). Losses of raw materials and products of their processing in animal husbandry and meat industry. *Vsyo o Myase*, 1, 8–11. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2023-1-8-11>
16. Карлова Н. А., Паюрова Е. Н., Галактионова Е. А. (2026). Пищевые отходы в розничной торговле России: методологические подходы и количественная оценка. *Вопросы экономики*, 2, 127–144. [Karlova, N.A., Payurova, E.N., Galaktionova, E.A. (2026). Food waste in Russian retail: Methodological approaches and quantitative assessment *Voprosy Ekonomiki*, 2, 127–134. (In Russian)] <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2026-2-127-144>
17. Гераймович, О.А. (2016). Особенности производственного учета при выпуске продукции широкого ассортимента. *Молочная промышленность*, 1, 60–61. [Geraimovich, O.A. (2016). Special features of the production registration at manufacturing of wide range of products. *Dairy Industry*, 1, 60–61. (In Russian)]
18. Редакционная статья. (2016). Производственный учет. *Молочная промышленность*, 1, 56–59. [Editorial article. (2016). Performance record. *Dairy Industry*, 1, 56–59. (In Russian)]
19. Редакционная статья. (2016). Производственный учет. Пересчет норм расхода сырья на сливки. *Молочная промышленность*, 7, 70–71. [Editorial article. (2016). Production recoding. Recalculation of the norms for raw materials expenditures for cream production. *Dairy Industry*, 7, 70–71. (In Russian)]
20. Фокина, Н.З., Степанова, Б.Н. (2016). Производственный учет. Пересчет норм расхода сырья на сметану. *Молочная промышленность*, 11, 56–57. [Fokina, N.Z., Stepanova, B.N. (2016). Production recording. Recalculation of the norms of the raw milk materials applied for sour cream production. *Dairy Industry*, 11, 56–57. (In Russian)]
21. Редакционная статья. (2017). Производственный учет. Пересчет норм расхода сырья на творог. *Молочная промышленность*, 1, 65–66. [Editorial article. (2017). Production recording. Recalculation of the norms of the raw materials usage for curds production. *Dairy Industry*, 1, 65–66. (In Russian)]
22. Редакционная статья. (2017). Производственный учет. Пересчет норм расхода сырья на творожные изделия и творожные полуфабрикаты. *Молочная промышленность*, 2, 75–76. [Editorial article (2017). Production recording. Recalculation of the norms for the raw materials expenditures for curds and curds semi-finished products manufacturing. *Dairy Industry*, 2, 75–76. (In Russian)]
23. Редакционная статья. (2017). Производственный учет. Пересчет норм расхода сырья на масло. *Молочная промышленность*, 4, 68–70. [Editorial article. (2017). Production recording. Recalculation of the norms of the raw materials usage for the dairy butter. *Dairy Industry*, 1, 68–70. (In Russian)]
24. Редакционная статья. (2017). Производственный учет. Пересчет норм расхода сырья на сыр. *Молочная промышленность*, 3, 78–79. [Editorial article. (2017). Production recording. Recalculation of the expenses norms of raw materials for cheese production. *Dairy Industry*, 3, 78–79. (In Russian)]
25. Карлова, Н.А., Паюрова, Е.Н., Галактионова, Е.А. (2024). Потери продукции в сельском хозяйстве России: последствия для продовольственной безопасности и экологической устойчивости. *Вопросы экономики*, 11, 76–89. [Karlova, N.A., Payurova, E.N., Galaktionova, T.A. (2024). Production losses in Russian agriculture: Impact on food security and environmental sustainability. *Voprosy Ekonomiki*, 11, 76–89. (In Russian)] <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2024-11-76-89>
26. Свириденко, Ю.Я., Волкова, Т.А. (2014). Ключевые направления снижения потерь в сыродельной отрасли. *Сыроделие и маслоделие*, 5, 30–32. [Sviridenko, Yu.Ya., Volkova, T.A. (2014). Key ways to reduce losses in the cheese making sector. *Cheese- and Buttermaking*, 5, 30–32. (In Russian)]
27. Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario F., Tubiello F. N., Leip A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2, 198–209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
28. Ковалева, О.В., Санникова, Н.В., Шулепова, О.В. (2020). Уровень загрязненности сточных вод молокоперерабатывающих предприятий Тюменской области. *Самарский научный вестник*, 9(1(30)), 49–54. [Kovaleva, O.V., Sannikova, N.V., Shulepova, O.V. (2020). The pollution level of wastewater from dairy processing enterprises of the Tyumen region. *Samara Journal of Science*, 9(1(30)), 49–54. (In Russian)] <https://doi.org/10.24411/2309-4370-2020-11107>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Карлова Наталия Алексеевна — кандидат экономических наук, ведущий отделом исследований аграрных рынков, Института аграрных исследований, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» 109028, Москва АУК «Покровский бульвар», Покровский б-р, д. 11, L214 E-mail: nkarlova@hse.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4565-8714</p>	<p>Nataliya A. Karlova, Candidate of Economic Sciences, Head of the Department of Agricultural Markets Research, Institute for Agrarian Studies, National Research University Higher School of Economics 11 Pokrovsky Boulevard, 109028, Moscow, Russia E-mail: nkarlova@hse.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4565-8714</p>
<p>Паюрова Елена Николаевна — кандидат экономических наук, эксперт, отдела исследований аграрных рынков, Института аграрных исследований, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» 109028, Москва АУК «Покровский бульвар», Покровский б-р, д. 11, L214 E-mail: epayurova@hse.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6756-5570</p>	<p>Elena N. Payurova, Candidate of Economic Sciences, Expert, Department of Agricultural Markets Research, Institute for Agrarian Studies, National Research University Higher School of Economics 11 Pokrovsky Boulevard, 109028, Moscow, Russia E-mail: epayurova@hse.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6756-5570</p>
<p>Галактионова Екатерина Андреевна — стажер-исследователь, отдела исследований аграрных рынков, Института аграрных исследований, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» 109028, Москва АУК «Покровский бульвар», Покровский б-р, д. 11, L214 E-mail: egalaktionova@hse.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7573-6432 * автор для контактов</p>	<p>Ekaterina A. Galaktionova, Intern-Researcher, Department of Agricultural Markets Research, Institute for Agrarian Studies, National Research University Higher School of Economics 11 Pokrovsky Boulevard, 109028, Moscow, Russia E-mail: egalaktionova@hse.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7573-6432 * corresponding author</p>
Критерии авторства	Contribution
<p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.</p>	<p>Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.</p>
Конфликт интересов	Conflict of interest
<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>	<p>The authors declare no conflict of interest.</p>

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-86-97>



Поступила 07.08.2025

Поступила после рецензирования 13.03.2026

Принята в печать 17.03.2026

© Кулиев З. В., Якубов К. Г., Алиев Э. М., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОЦЕССА СБИВАНИЯ СЛИВОК В МАСЛОИЗГОТОВИТЕЛЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С РАБОЧИМ ОРГАНОМ ТИПА ЛЕНТЫ МЁБИУСА

Кулиев З. В.*[†], Якубов К. Г., Алиев Э. М.

Научно-исследовательский Институт «Агромеханика», Гянджа, Азербайджан

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

центробежная сила, центробежная скорость, вихревые потоки, частота вращения, лента Мёбиуса, сбивание сливок, жировые шарики

Исследование посвящено изучению гидродинамических процессов, возникающих при сбивании сливок в аппарате с рабочим органом в форме двойной ленты Мёбиуса. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности производства сливочного масла, особенно для малых фермерских хозяйств, где традиционные методы сбивания часто оказываются энергоёмкими и недостаточно продуктивными. Целью исследования является анализ характеристик потоков, формируемых рабочим органом, и их влияния на процесс сбивания сливок. Объектом исследования выступал маслоизготовитель с рабочим органом в виде двойной ленты Мёбиуса, расположенный в Научно-исследовательском институте «Агромеханика» (Гянджа, Азербайджан). Методы включали математическое моделирование для анализа центробежных и вихревых потоков, а также определение ключевых параметров, таких как частота вращения ($n=700 \rightarrow 900$ об/мин) и ширина лент ($b=0,03 \rightarrow 0,05$ м). Использовались формулы для расчёта центробежной скорости, силы и турбулентных потоков. Результаты показали, что увеличение частоты вращения до $n=900$ об/мин и ширины ленты до $b=0,05$ м приводит к максимальным значениям центробежной скорости ($v=12,5$ м/с) и силы ($F=1408,5$ Н), что значительно интенсифицирует процесс сбивания. Турбулентные потоки, создаваемые лентой Мёбиуса, способствуют равномерному перемешиванию и разрушению оболочек жировых шариков. Теоретические исследования показали, что наибольшая гидродинамическая активность формируется в периферийной зоне рабочей ёмкости, где, согласно расчётным данным, создаются наиболее благоприятные условия для коалесценции жировых шариков и формирования масляных зёрен. Полученные результаты позволяют прогнозировать, что реализация указанных гидродинамических режимов может способствовать сокращению продолжительности процесса сбивания и снижению удельных энергозатрат. Экспериментальная оценка данных эффектов требует проведения дополнительных исследований и является предметом дальнейшей работы.

Received 07.08.2025

Accepted in revised 13.03.2026

Accepted for publication 17.03.2026

© Guliev Z. V., Yakubov K. H., Aliev E. M., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

THEORETICAL ANALYSIS OF HYDRODYNAMICS OF THE CREAM CHURNING PROCESS IN A BATCH BUTTER CHURN EQUIPPED WITH A MÖBIUS STRIP WORKING BODY

Zakir V. Guliev*, Kamal H. Yakubov, Elman M. Aliev

«Agromechanics» Research Institute, Ganja, Azerbaijan

KEYWORDS:

centrifugal force, centrifugal velocity, vortex flows, rotational frequency, Möbius strip, whipping cream, fat globules

ABSTRACT

The study investigates the hydrodynamic processes occurring during the whipping of cream in a device with a working element shaped like a double Möbius strip. The relevance of the work stems from the need to improve the efficiency of butter production, particularly for small-scale farms, where traditional churning methods are often energy-intensive and insufficiently productive. The aim of the research is to analyze the flow characteristics generated by the working element and their impact on the cream-whipping process. The object of the study was a butter churn with a double Möbius strip working element, located at the «Agromechanics» Research Institute (Ganja, Azerbaijan). Methods included mathematical modeling to analyze centrifugal and vortex flows, as well as the determination of key parameters such as rotational speed ($n=700 \rightarrow 900$ rpm) and strip width ($b=0.03 \rightarrow 0.05$ m). Formulas for calculating centrifugal velocity, force, and turbulent flows were applied. The results showed that increasing the rotational speed to $n=900$ rpm and the strip width to $b=0.05$ m leads to maximum values of centrifugal velocity ($v=12.5$ m/s) and force ($F=1408.5$ N), significantly intensifying the churning process. The turbulent flows generated by the Möbius strip promote uniform mixing and the disruption of fat globule membranes. The theoretical investigations show that the highest hydrodynamic activity is formed in the peripheral zone of the working chamber, where according to the calculated data, the most favorable conditions are created for coalescence of fat globules and formation of butter grains. The results obtained make it possible to predict that realization of the indicated hydrodynamic regimes can facilitate reduction of the duration of the churning process and specific energy consumption. The experimental assessment of these effects requires additional studies and is the subject of the further work.

1. Введение

Одним из важнейших продуктов животноводства, предназначенных для непосредственного потребления, является сливочное масло с массовой долей жира 50–85%. Существующие технологии получения сливочного масла различаются по сущности применяемых методов и их аппаратному исполнению.

В зависимости от масштабов производства для получения сливочного масла применяются различные технологические подходы: при переработке значительных объёмов сливок используется технология преобразования высокожирных сливок на маслообразователях, тогда как для малых объёмов характерен метод периодического сбивания сливок в маслоизготовителе.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кулиев, З. В., Якубов, К. Г., Алиев, Э. М. (2026). Теоретический анализ гидродинамики процесса сбивания сливок в маслоизготовителе периодического действия с рабочим органом типа ленты Мёбиуса. *Пищевые системы*, 9(1), 86–97. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-86-97>

FOR CITATION: Guliev, Z. V., Yakubov, K. H., Aliev, E. M. (2026). Theoretical analysis of hydrodynamics of the cream churning process in a batch butter churn equipped with a Möbius strip working body. *Food Systems*, 9(1), 86–97. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-86-97>

В условиях развития малых форм хозяйствования и локальных перерабатывающих производств актуальной является задача совершенствования маслоизготовителей периодического действия, ориентированных на переработку ограниченных объемов сливок, характерных для крестьянско-фермерских хозяйств. В этом контексте разработка и теоретическое обоснование конструкций маслоизготовителей малой производительности, обеспечивающих интенсификацию процесса сбивания, представляет научный и практический интерес.

Основным сырьём для производства сливочного масла являются не сквашенные и сквашенные сливки. Последние в ряде зарубежных источников называют «йогуртом», что относится к национальным особенностям классификации молочных продуктов и не соответствует регуляторным требованиям стран ЕАЭС, в связи с чем в настоящей работе данный объект не рассматривается как самостоятельный вид сырья для маслоделия [1].

Вне зависимости от используемой технологии основным этапом производства сливочного масла является процесс сбивания, направленный на трансформацию жировой фазы и формирование структуры продукта. Сбивание сливок представляет собой сложный физико-химический и гидромеханический процесс, основанный на механическом разрушении оболочек жировых шариков, их агрегации и последующей коалесценции с формированием пространственно-структурированной системы сливочного масла. Эффективность процесса в значительной степени определяется конструкцией рабочего органа, механизма сбивания и создаваемыми им гидродинамическими условиями [2,3].

В маслоизготовителях периодического действия агрегация жировых шариков в процессе сбивания сливок протекает как на межфазной границе «молочная плазма — воздух», так и в объёме жидкой фазы. Эффективность данного процесса в значительной степени определяется предварительной подготовкой сливок к сбиванию, а также их массовой долей жира, что влияет на интенсивность агрегации жировых шариков, величину потерь жира с пахтой и продолжительность процесса сбивания.

Внутри объёмной фазы агрегация не является следствием лишь случайных столкновений между жировыми шариками, она преимущественно обусловлена действием пенообразования и механизмом флотации, при котором жировые шарики адсорбируются на поверхности пузырьков воздуха.

Для того чтобы столкновения жировых шариков приводили к их агрегации, они должны обладать достаточной кинетической энергией для преодоления энергетических и структурно — механических барьеров. Однако в маслоизготовителях периодического действия, где скорость движения сливок сравнительно низка, необходимую энергию получают лишь отдельные частицы жира. Это обуславливает увеличение продолжительности процесса сбивания и снижение его технологической эффективности, выражающееся в увеличении потерь жира с пахтой при неблагоприятных гидродинамических условиях и недостаточном развитии воздушной фазы.

Анализ теоретических основ процесса сбивания сливок и формирования масляного зерна [4,5], позволяет выделить три ключевых фактора, определяющих эффективность работы маслоизготовителей периодического действия. Наиболее существенное влияние оказывают:

- активное пенообразование, способствующее флотации жировых шариков;
- наличие выраженной турбулентности потока, усиливающей перемешивание;
- кавитационные явления, способные временно разрушать структурные барьеры и повышать степень агрегации жира.

Таким образом, воздействие рабочих органов маслоизготовителя на сливки должно сопровождаться генерацией указанных эффектов, что в совокупности повышает интенсивность сбивания и способствует формированию устойчивой структуры масляного зерна.

Следовательно, при проектировании маслоизготовителей периодического действия целесообразно ориентироваться на конструктивные решения, обеспечивающие повышение эффективности их работы за счёт совершенствования рабочих органов и выбора рациональных режимов функционирования. Такие режимы должны сопровождаться развитым пенообразованием, интенсивной турбулентностью потока и проявлением кавитационных эффектов. В последние годы особое внимание уделяется разработке нестандартных геометрий рабочих органов маслоизготовителей, способствующих повышению интенсивности сбивания сливок и, как следствие, увеличению производительности установок.

В работах А. В. Яшина и Ю. В. Польшанова [6,7] предложена конструкция маслоизготовителя периодического действия с гибким виброприводом, в которой рабочий орган выполнен в виде эластич-

ной мембраны, одновременно являющейся дном ёмкости и совершающей периодические колебательные движения, реализуемые посредством кривошипно-шатунного механизма. По данным экспериментальных исследований авторов, применение указанного рабочего органа позволяет снизить потери жира, обусловленные его налипанием на элементы механизма сбивания, а также уменьшить энергоёмкость процесса. Так, при сбивании сливок степень использования молочного жира достигала $S=99,6\%$, что соответствовало содержанию жира в пахте на уровне $0,4\%$ и требованиям действующего стандарта на сливочное масло¹. Энергоёмкость процесса сбивания составляла $\mathcal{E}_s = 3,84$ Вт·ч/кг при производительности установки $Q_m = 11,25$ кг/ч и мощности привода $N_{пр} = 43,2$ Вт [6].

К числу существенных недостатков данной разработки относится рабочий орган в виде мембраны, являющейся одновременно донной частью рабочей камеры. Мембрана постоянно подвергается циклическим нагрузкам при контакте с продуктом, а также воздействию агрессивных моющих и дезинфицирующих средств в процессе санитарной обработки оборудования.

Совокупность указанных факторов приводит к возникновению микротрещин вследствие циклических деформаций, ускоренному старению материала (особенно в случае применения эластомерных композиций) и к необходимости регулярной замены или ремонта мембраны, что повышает эксплуатационные затраты. Кроме того, в процессе работы наблюдается неравномерное распределение энергии и механических воздействий на перерабатываемый продукт, что приводит к недостаточному развитию турбулентных потоков и увеличению общей продолжительности процесса переработки сливок в сливочное масло.

Указанные недостатки свидетельствуют о целесообразности модернизации конструкции, предусматривающей применение более износостойких материалов, изменение компоновки рабочего органа, а также переход к более устойчивым способам передачи движения, например с использованием вращательных или планетарных механизмов.

Для интенсификации процесса сбивания сливочного масла А. Яшин и Ю. Польшанов [7] предложили конструкцию маслоизготовителя периодического действия, обеспечивающую снижение энергоёмкости процесса за счёт формирования бегущей волны, создаваемой роторно-лопастным рабочим органом. Закрепление рабочего органа в горизонтальной плоскости с эксцентриситетом относительно центра рабочей ёмкости способствует устранению застойных зон по всему объёму перерабатываемых сливок. Поперечное сечение рабочего органа представляет собой замкнутый синусоидальный контур. По данным экспериментальных исследований авторов, при оптимальных конструктивных и кинематических параметрах энергоёмкость процесса сбивания составила $7,25$ Вт ч/кг при производительности $13,4$ кг и потребляемой мощности $97,2$ Вт.

Несмотря на нестандартные технические решения (эксцентриситет, бегущая волна, синусоидальный профиль), конструкция маслоизготовителя обладает рядом недостатков, снижающих её универсальность, технологическую гибкость и эксплуатационную надёжность. Так в процессе сбивания сливок энергоёмкость может вырасти по причине ее затрат на трение из — за сложной формы рабочего органа (синусоидальный контур), неоптимального распределения нагрузки из — за эксцентриситета, неполного охватывания сырья. Кроме того, к недостаткам можно отнести так же и сложность конструкции и ее обслуживания. Так закрепление рабочего органа с эксцентриситетом требует точной балансировки, что усложняет изготовление и повышает риск вибраций при износе подшипников. Стоит отметить, что производство и очистка синусоидального контура лопастей — трудоёмкие процессы, особенно при работе с вязкими, налипающими продуктами. Для устранения этих недостатков следовало бы оптимизировать форму лопастей с целью снижения энергопотребления и упрощения обслуживания установки.

А. Альджаафрах и др. [8] была разработана установка для производства сливочного масла из йогурта, полученного из овечьего и козьего молока. Процесс переработки на данном устройстве включает следующие стадии: молоко перемешивается и пастеризуется при температуре 90°C в течение 5 минут, затем охлаждается до 43°C и подвергается заквашиванию с целью получения йогурта. После завершения ферментации продукт охлаждают до 14°C , сливки подвергаются сбиванию, в результате чего происходит отделение сливочного масла от пахты. Рабочим органом для перемешивания и сбивания служит диск. По его периферии на верхней и нижней поверхностях

¹ ГОСТ 32261-2013 «Масло сливочное. Технические условия». Москва: Стандартинформ, 2019. — 23 с.

расположены радиальные зубчатые выступы в форме лопастей, установленные под углом 90° . Диск установлено на валу, которому двигатель передаёт возвратно — поступательное движение. Процесс сбивания на данном устройстве в зависимости от скорости рабочего органа ($1000 \rightarrow 2000$ об/мин) длилось $35 \rightarrow 110$ минут, а выход жира в пахту составило $0,47\%$ [8].

Одним из существенных недостатков данного устройства является практически полное отсутствие вдоль стенок в рабочей емкости отбойников и минимальная площадь поверхности соприкосновения с продуктом на механизме перемешивания и сбивания. Отсутствие отбойников приводит к недостаточному развитию турбулентного течения сырья и, как следствие, к снижению эффективности перемешивания и нерациональному распределению механических воздействий в объёме рабочей камеры. В результате не реализуется ключевой этап технологии — эффективное сбивание сливок, поскольку при пониженной частоте контактов между жировыми шариками замедляется их коалесценция, приводящая к формированию масляных зёрен. Минимальная площадь контакта рабочих поверхностей с продуктом ограничивает количество зацепляющих, срезающих и ударных элементов. Это приводит к снижению интенсивности гидродинамического воздействия на структуру продукта. Указанный конструктивный недостаток механизма перемешивания приводит к увеличению энергоёмкости технологического процесса и снижению выхода готового продукта, в следствии удлинения процесса сбивания и увеличения отхода жира в пахту. Для устранения этих недостатков требуется пересмотр гидродинамических условий в рабочей камере и модернизация механизма взбивания.

Kalla A. M. с соавторами [9] разработан маслоизготовитель для малых хозяйств, рабочая емкость которого выполнена в форме усечённого конуса и оснащена двойными стенками для терморегуляции с циркулирующей охлаждённой водой. Механизм сбивания представляет собой лопасть с двойными стенками прикрепленной к стенкам емкости под углом к оси вращения. Установка способна производить из $3,33$ кг сливок ($J=40\%$) $1,56$ кг масла в течении 40 мин при скорости вращения $n=60$ об/мин. При этом жирность масла составляет $82,7\%$, массовая доля влаги 16% , при этом минимальный отход жира в пахту $0,5\%$. Данная установка имеет низкое энергопотребление ($367,75$ Вт, $n=1400$ об/мин), привод состоит из редуктора (1:20) и системы шкивов для регулировки скорости ($35, 60, 85$ об/мин). Установка менее компактна и подходит для малых фермерских хозяйств [9].

Рабочий орган данной установки, одиночная наклонная лопасть с двойными стенками, расположенная под углом к оси вращения, может привести к дисбалансу при максимальной скорости сбивания ($n=85$ об/мин), в следствии чего произойдет ускоренный износ подшипников и редуктора. Потери жира с пахтой достигают $0,5\%$. При высоких частотах вращения коническая форма емкости и специфика рабочего органа могут вызывать избыточную турбулентность. Это повышает риск потерь жира с пахтой, а интенсивная аэрация смеси ведет к нежелательному росту массовой доли влаги в сливочном масле.

Упрощенный маслоизготовитель периодического действия для малых хозяйств, предложен С. А. Лазуткиной и М. Р. Миннибаевым [10]. Он представляет собой вертикальную цилиндрическую емкость с внутренними ребрами прямоугольной формы. Механизмом сбивания, расположенный в нижней части емкости, представляет собой плоский диск с прямоугольными лопастями, которые установлены под прямым углом к диску. Энергоёмкость данной установки составляет до 2 кВт/кг. В процессе сбивания предполагалось формирование турбулентного перемешивающего потока исключительно за счёт работы механизма сбивания, без дополнительных ударных воздействий на сливки, что должно способствовать получению продукта с высокой массовой долей жира, сохранению шаровидной формы масляных зёрен и, как следствие, снижению потерь жира с пахтой [10].

Неоптимальная геометрия лопастей, отсутствие изгибов и их жесткое крепление под прямым углом, увеличивает вероятность создания неравномерного турбулентного потока. Последствиями этого могут быть менее интенсивное перемешивание в верхней части емкости и избыток вихревых зон в нижней, что может привести к разрушению структуры масляных зёрен. Кроме того, противоположное от центра направление лопастей приведет к дисбалансу потока, образуя в зоне между лопастями «мертвые зоны» с низкой турбулентностью. При этом могут возрастать риск локального перегрева продукта, неравномерность сбивания и увеличение продолжительности технологического процесса.

М. Эбрахими и соавторы [11] разработали установку периодического действия для производства сливочного масла из сливок или йогурта с возвратно — поступательным механизмом. Установка

состоит из рамы, барабана ($13,5-21,3$ л), кривошипно — шатунного механизма и электропривода ($2,9$ кВт, $n=1400$ об/мин + редуктор (1:40)). Конструкция установки отличается простотой, а за счёт имитации традиционного метода отличается формированием характеристик продукта, сопоставимых с показателями, достигаемыми при классических способах производства. В процессе сбивания, для оптимизации выхода масла, возможно плавно регулировать амплитуду ($40 \rightarrow 80$) и частоту ($50 \rightarrow 72$ цикл/мин). Основной принцип работы состоит в том, что в результате механического воздействия происходит разрушение жировых глобул, формирование масляных зёрен и отделение пахты. Данная установка является оптимальным решением для малых ферм [11].

Отсутствие внутри рабочей емкости перфорированных перегородок или рёбер, а также линейное движение самой емкости приводит к неравномерному перемешиванию и ограничению, основного фактора при сбивании, формировании турбулентного потока. В результате в объеме не возникают вихревые и сдвиговые потоки, необходимые для эффективной коалесценции жировых глобул. Отсутствие закрученных потоков приводит к образованию «мертвых зон», особенно в центральной части емкости.

Во всех рассматриваемых разработках исследуется в основном влияние геометрии и типа рабочего органа на физико — химические процессы сбивания и турбулентности потока, которые и являются определяющими факторами при производстве сливочного масла. Особое внимание уделено роли конструкции рабочего органа в создании требуемых гидродинамических условий, обеспечивающих равномерное перемешивание продукта и минимизацию мёртвых зон. Во всех рассмотренных конструкциях выявлены типичные проблемы как недостаточная площадь контакта рабочих органов с продуктом, неравномерность распределения усилий, мёртвые зоны в объеме продукта и как следствие отсутствие развитой турбулентности. Указанные недостатки в конструкциях современных маслоизготовителей периодического действия обуславливают необходимость разработки более совершенных рабочих органов, способных обеспечить развитие турбулентных, сдвиговых и кавитационных эффектов, интенсифицировать процесс сбивания, сократить время обработки и потери жира.

Наиболее перспективными являются механизмы с улучшенной геометрией, обеспечивающей активное перемешивание без избыточной нагрузки на конструкцию. В связи с этим, для маслоизготовителя периодического действия, предложена принципиально новая конструкция, где механизмом сбивания является рабочий орган в форме двойной ленты Мёбиуса, создающий сложные вихревые потоки за счет геометрических особенностей.

Цель данной работы — это анализ характеристик потоков, возникающих при взбивании сливок, и их влияние на эффективность процесса, а также теоретическое обоснование гидродинамических процессов в аппарате с рабочим органом в форме двойной ленты Мёбиуса.

2. Объекты и методы

2.1. Физическая модель процесса

Рабочий орган, механизм сбивания (Рисунок 1), выполнен в виде двух лент, внешней 8 и внутренней 9, концы которых развёрнуты на 180° , образуя Мёбиусовы ленты. При этом завивка внутренней ленты 9 направлена против завивки внешней ленты 8. Обе ленты вращаются в одном и том же направлении. Они жестко закреплены на стержне 7, который соединен с валом 5. Верхняя часть вала зафиксирована в самоцентрирующемся подшипнике 3, установленном на кронштейне 4 в верхней части емкости 2. Нижняя часть через втулки 16 и 17 соединена с промежуточным валом 14, который опирается на уплотнительный узел 10, расположенный на дне емкости. На промежуточном вале 14 установлен шкив 12 с клиновидным ремнем 11, который соединяется с электродвигателем (на схеме не указана). Рабочая емкость 2 имеет крышку 1, сливной патрубков 13 и отбойники 6.

Данная конструкция обеспечивает стабильное вращение и эффективную работу механизма сбивания.

2.2. Основные параметры системы:

- диаметры лент: внешняя лента — $D_1=0,220$ м, внутренняя лента — $D_2=0,210$ м;
- ширина лент: I вариант — $b_1=0,03$ м, II вариант — $b_2=0,04$ м, III вариант — $b_3=0,05$ м;
- диаметр рабочей емкости: $DE=0,36$ м;
- высота рабочей емкости: $H=0,5$ м;
- объем сливок: $V=0,022$ м³;

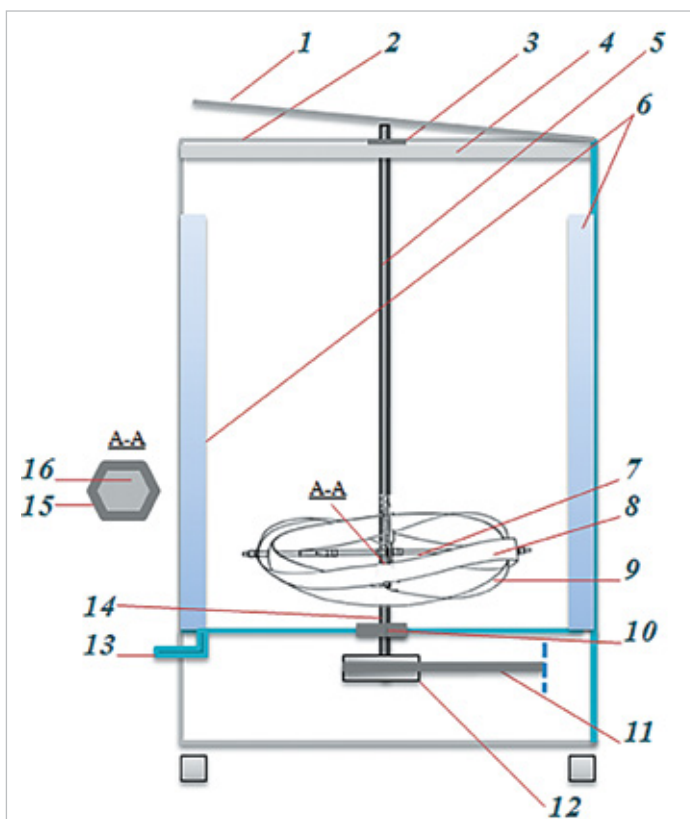


Рисунок 1. Маслоизготовитель периодического действия с рабочим органом в форме двойной ленты Мёбиуса:

1 – крышка; 2 – рабочая емкость; 3 – самоцентрирующийся подшипник с вращающейся опорой; 4 – кронштейн; 5 – вал; 6 – отбойники; 7 – стержень; 8 – внешняя лента; 9 – внутренняя лента; 10 – уплотнительный узел; 11 – клиновидный ремень; 12 – ведомый шкив; 13 – сливной патрубков; 14 – промежуточный вал; 15 и 16 – втулки

Figure 1. Batch – operated butter churn with a working body in the form of a double Möbius strip: 1 – cover; 2 – working chamber; 3 – self-centering bearing with rotating support; 4 – bracket; 5 – working member shaft; 6 – deflectors; 7 – rod; 8 – outer belt; 9 – inner belt; 10 – sealing assembly; 11 – V – belt; 12 – driven pulley; 13 – drain pipe; 14 – intermediate shaft; 15 and 16 – bushings

- плотность сливок: $\rho = 997 \text{ кг/м}^3$;
- массовая доля жира в сливках – 35 %;
- вязкость сливок $\mu = 0,02\text{--}0,04 \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- частота вращения механизма сбивания: I вариант – $n_1 = 700 \text{ об/мин}$, II вариант – $n_2 = 800 \text{ об/мин}$, III вариант – $n_3 = 900 \text{ об/мин}$.

2.3. Гидродинамические особенности потока:

При вращении:

- центробежные силы перемещают сливки от центра к периферии;
- противоположное скручивание лент создает зоны сдвига, способствующие турбулентности.

2.4. Методология

Исследование основано на теоретическом анализе движения вязкой дисперсной среды в рабочей ёмкости маслоизготовителя с учётом гидродинамических характеристик потока. При этом вязкость сливок рассматривается как эффективный параметр, зависящий от их массовой доли жира и температуры сбивания, что потенциально оказывает влияние на характер турбулентного движения и величину возникающих центробежных сил. В рамках настоящего исследования анализ проводится при фиксированных диапазонах указанных параметров, соответствующих условиям технологического процесса. Основные параметры:

- Центробежная скорость:

$$v = \omega \times (r + kb), \text{ (м/с)} \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi n / 60, \text{ (рад/с)} \quad (2)$$

где: ω – угловая скорость, рад/с; n – частота вращения рабочего органа, об/мин; r – радиус ленты, м; b – ширина лент, м; k – поправочный коэффициент, характеризующий изменение скорости по ширине ленты, $k = 0,5$.

Обобщенная средняя центробежная скорость $v_{o.c.p.}$, рассчитанная с учетом параметров обеих рабочих лент:

$$v_{o.c.p.} = \frac{v_1 + v_2}{2}, \text{ (м/с)} \quad (3)$$

- Центробежная сила F :

$$F = \rho V \frac{\omega^2}{b} \frac{(r + kb)^3 - r^3}{3}, \text{ (Н)} \quad (4)$$

где: ρ – плотность сливок, кг/м³; V – объем сливок, м³.

Данная формула учитывает распределение массы по ширине ленты. Масса жидкости распределяется по ширине ленты от радиуса r до радиуса $r + b$. Поскольку каждая элементарная масса частицы расположена на разном расстоянии от оси вращения, расчет выполняется путем интегрирования по ширине ленты b .

При решении этого интеграла стандартным методом появляется коэффициент $\frac{(r + kb)^3 - r^3}{3}$. Здесь число 3 – это результат интегрирования выражения вида r^2 по ширине b и является результатом усреднения момента инерции массы жидкости по ширине колеса. Оно учитывает, что:

- распределение массы жидкости не на одном радиусе r , а в интервале от r до $r + b$;
- зависимость центробежной силы от куба радиуса (r^3), что при усредненном влиянии ширины даёт деление на 3.

Обобщенная средняя центробежная сила $F_{o.c.p.}$, рассчитанная с учетом параметров обеих рабочих лент:

$$F_{o.c.p.} = \frac{F_1 + F_2}{2}, \text{ (Н)} \quad (5)$$

- Анализ турбулентных потоков проводился по двум компонентам скорости: горизонтальной (U , м/с), определяющей движение вдоль радиуса вращения, и вертикальной (V , м/с), фиксирующей восходящие и нисходящие потоки:

$$U = -v_{o.c.p.} \cdot \cos\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right), \text{ (м/с)} \quad (6)$$

$$V = -v_{o.c.p.} \cdot \sin\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right), \quad (7)$$

где: θ – угол поворота, °.

Для анализа использовались численные методы интегрирования и графические иллюстрации зависимостей.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Центробежные скорости и силы

Механизм сбивания (Рисунок 1) выполнен в форме двойной ленты Мёбиуса с противоположно направленной завивкой полос (внешней 8 и внутренней 9). Благодаря такой геометрии в сливках создаются сложные вихревые потоки, которые ускоряют разрушение оболочек жировых шариков и их последующую агрегацию (слипание).

Движение сливок по ленте Мёбиуса определяется следующими факторами:

- неравномерное распределение потоков - поскольку лента Мёбиуса не имеет разделения на внутреннюю и внешнюю стороны (односторонняя поверхность), потоки непрерывно меняют направление по всей её длине;
- динамика центробежных сил-вращение вызывает движение сливок к периферии, но уникальная структура ленты приводит к перераспределению скоростей и формированию интенсивных циркуляционных потоков;
- турбулентность и напряжения сдвига – вихревые зоны и сдвиговые усилия ускоряют разрушение белковой оболочки жировых шариков, способствуя их агрегации.

Под действием центробежных сил сливки перемещаются от центральной зоны обеих лент к периферии, формируя интенсивный поток. Возникающее при этом центробежное ускорение направляет поток от центральной зоны к стенкам рабочего объема. Благодаря различным радиусам внешней и внутренней лент, а также градиенту скоростей по их ширине, дисперсные частицы жировой фазы сливок движутся с разными скоростями, создавая локальные турбулентные зоны. Кроме того, взаимодействие встречных потоков, возникающих благодаря противоположно направленным завивкам лент, вызывает деформации сдвига и трения, что усиливает столкновения жировых

шариков, приводя к разрушению их оболочек и ускорению процесса агрегации жировых частиц.

Поток сливок, направляемый центробежным действием от центра к стенкам рабочей ёмкости, формируется под воздействием частоты вращения механизма сбивания. При этом скорость потока прямо пропорционально возрастает с увеличением окружной скорости и радиуса вращения механизма сбивания. Усиление центробежной силы значительно повышает интенсивность перемешивания и сдвиговых деформаций.

При увеличении частоты вращения механизма сбивания в диапазоне $n = 700 \rightarrow 900$ об/мин, наблюдаются следующие закономерности — центробежная скорость возрастает пропорционально частоте вращения в диапазоне $v_{o,cr.} = 8,98 \rightarrow 12,5$ м/с, а центробежная сила увеличивается пропорционально квадрату частоты вращения в диапазоне $F_{o,cr.} = 780,83 \rightarrow 1408,47$ Н, (Рисунок 2). Данные зависимости демонстрируют линейную корреляцию между скоростью и частотой вращения ($v \propto n$), а также квадратичную зависимость силы от частоты ($F \propto n^2$), (\propto — символ пропорциональности).

Таким образом, увеличение частоты вращения усиливает центробежные эффекты, что способствует ускорению сбивания сливок. Это обеспечивает интенсивное перемешивание и сдвиговую деформацию среды, что ускоряет разделение фаз и агрегацию жировых шариков. Однако повышение частоты вращения до $n = 900$ об/мин способно вызвать неравномерное распределение сливок в рабочей ёмкости и чрезмерное пенообразование, уменьшение производительности вследствие реэмульгирования молочного жира.

При варьировании ширины лент происходит изменение гидродинамической картины процесса. С ее изменением меняется объём сливок, включённых в движение, что приводит к модификации структуры потока и уровня турбулентности. Так при $b_3 = 0,05$ м, интенсивность воздействия на сливки увеличивается, создаются повышенные напряжения сдвига, существенно меняются реологические характеристики потока. При увеличении ширины ленты $b = 0,03 \rightarrow 0,05$ м, при росте частоты вращения $n = 700 \rightarrow 900$ об/мин, средний прирост центробежной скорости $v_{o,cr.}$ и силы $F_{o,cr.}$ составил $\approx 8\%$ (Рисунок 2).

Использование узких лент ($b_1 = 0,03$ м) позволяет генерировать интенсивные локальные вихри, которые усиливают турбулентное перемешивание и диспергирование фаз. Однако это может привести к пространственной неоднородности распределения сливок и формированию застойных зон.

Более широкие ленты ($b_3 = 0,05$ м) в состоянии обеспечить более однородное течение со стабильными скоростными характеристиками и предсказуемым распределением напряжений сдвига. Но при этом происходит снижение градиента скорости (dv/dr), что уменьшает эффективность деформации жировых шариков и требует увеличения частоты вращения для компенсации.

Как известно, процесс превращения сливок в сливочное масло обусловлен механическим воздействием, в результате которого

происходит разрушение белково-липопротеиновых оболочек жировых глобул и их последующая коалесценция с формированием непрерывной жировой структуры, характерной для масляного зерна. Ключевую роль здесь играют центробежные скорости и силы, формируемые периодически движущимся рабочим механизмом, а также связанные с ними механические колебания, сдвиговые и ударные воздействия. Интенсивность указанных эффектов определяется конструктивными и кинематическими параметрами оборудования (частота вращения, амплитуда движения, температурный режим и продолжительность обработки), что влияет на дисперсный состав жировых глобул сливок, скорость их агрегации и коалесценции, а также на формирование текстуры конечного продукта.

На Рисунке 3 в полярной системе координат визуализировано распределение центробежной скорости и силы вдоль радиуса ёмкости. Графики наглядно показывают зависимость этих параметров от частоты вращения и ширины лент Мёбиуса. В такой графической интерпретации, угол определяет положение точки на графике, тогда как расстояние от центра (радиус) отражает величину соответствующего параметра. Аналогичный подход к анализу и визуализации распределения центробежных скоростей и радиальных сил в полярной системе координат широко применяется при исследовании вращательных гидродинамических процессов в различных типах роторных аппаратов, включая насосные системы, что показано в работах Wang M. с соавторами [12], Cao W. с соавторами [13], а также Kang Y. с соавторами [14]. Несмотря на различие функционального назначения исследуемых объектов, методологическая общность данного подхода обусловлена идентичностью физической природы вихревого движения вязкой среды в ограниченном вращающемся объёме. Это подтверждает универсальность использования полярной системы координат как эффективного инструмента для анализа структуры потока, распределения динамических нагрузок и характера нестационарных гидродинамических явлений во вращающихся аппаратах независимо от их конструктивного исполнения и области применения.

Для точного описания центробежной скорости $v_{o,cr.}$ м/с и силы $F_{o,cr.}$ (Н), рабочая ёмкость представляется как полная окружность (360°). При этом центробежные параметры равномерно распределяются по углам в диапазоне $0^\circ \rightarrow 360^\circ$, с шагом 45° . Эти углы соответствуют положениям точек на окружности вращения механизма сбивания. Для расчётов радиус объёма переработки (при $DE = 0,36$ м) рассматривается в пределах $0 \rightarrow 0,180$ м, при этом выбираются 8 дискретных точек, равномерно распределённых с шагом $0,0225$ м: $0,0225$ м; $0,045$ м; $0,0675$ м; $0,09$ м; $0,1125$ м; $0,135$ м; $0,1575$ м; $0,18$ м.

В полярной системе координат каждая точка определяется двумя значениями: расстоянием от центра графика до анализируемой точки r , (м) (внутренний радиус обрабатываемого объёма $r = 0 \rightarrow 0,18$ м); углом поворота между положительным направлением оси X и линией, соединяющей центр с анализируемой точкой (угол, определяющий положение анализируемой точки на графике), θ , $^\circ$.

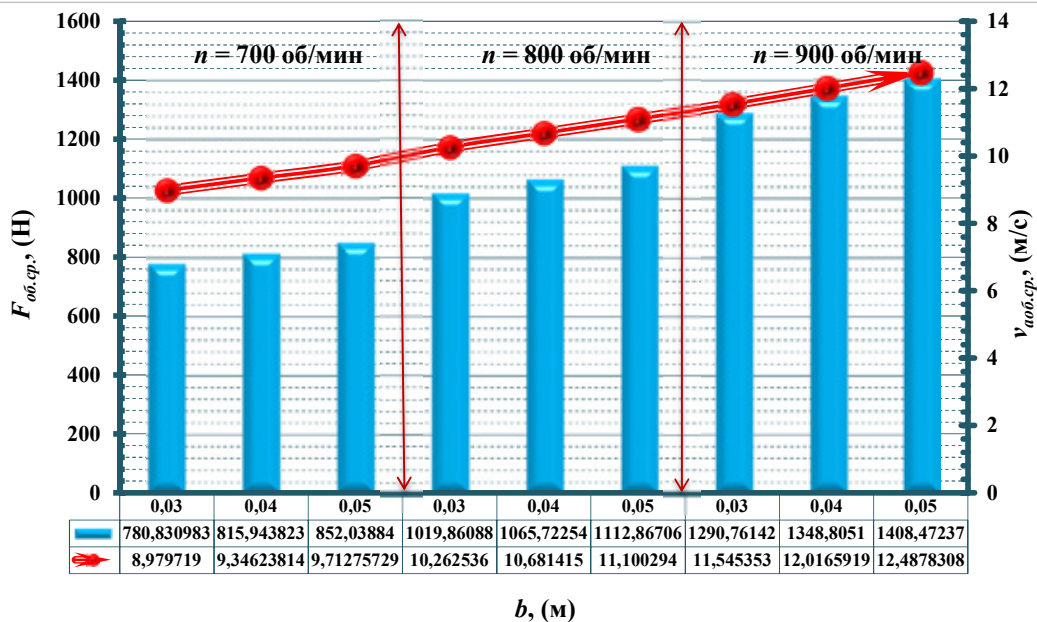


Рисунок 2. Зависимость центробежной скорости $v_{o,cr.}$ м/с и силы $F_{o,cr.}$ (Н) от n , (об/мин) и b , (м) механизма сбивания
 Figure 2. Dependence of the centrifugal velocity $v_{o,cr.}$ (m/s) and force $F_{o,cr.}$ (N) on n , (rpm) and b , (m) of the churning mechanism

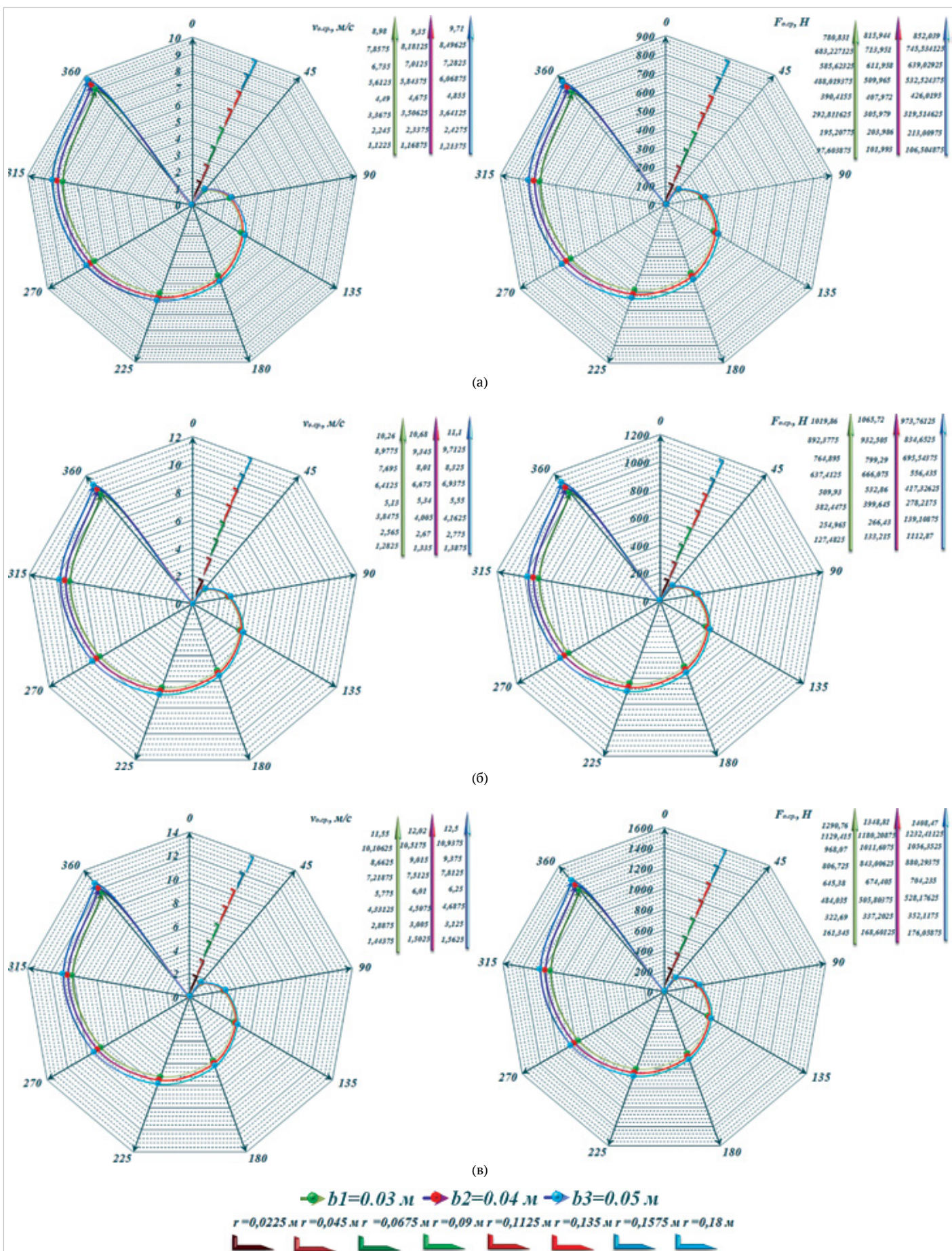


Рисунок 3. График распределения центробежной скорости $v_{o.a.}$ (м/с) и силы $F_{o.a.}$ (Н) по радиусу в рабочей емкости:

(а) — $n=700$ об/мин; (б) — $n=800$ об/мин; (в) — $n=900$ об/мин)

Figure 3. Graph of distribution of centrifugal velocity $v_{o.a.}$ (m/s) and force $F_{o.a.}$ (N) along the radius in the working tank:

(a) — $n=700$ rpm; (б) — $n=800$ rpm; (в) — $n=900$ rpm)

Значения центробежной силы и скорости были распределены искусственно равномерно по углам, так как вращение механизма сбивания идёт с постоянной угловой скоростью. Это стандартный метод построения полярных графиков для равномерно вращающихся систем.

Угол поворота θ изменяется в пределах $\theta=0^\circ \rightarrow 360^\circ$ в зависимости от радиуса обрабатываемого объема и определяется следующим образом:

$$\theta = \frac{r}{R} 360^\circ, \quad (8)$$

где r — текущий радиус обрабатываемого объема, $r=0 \rightarrow 0,18$ м; R — максимальный радиус обрабатываемого объема, $R=0,18$ м.

Пропорциональное распределение центробежной силы и скорости по радиусу обрабатываемого объема определяется следующим образом:

$$v(r) = v_{o.cp.} \frac{r}{R}, \quad (9)$$

$$F(r) = F_{o.cp.} \frac{r}{R}, \quad (10)$$

Центробежная скорость $v_{o.cp.}$ (м/с) и сила $F_{o.cp.}$ (Н) действующие на сливки, меняются линейно с радиусом емкости, поскольку они прямо пропорциональны ее радиусу:

$$v_{o.cp.} = \omega r. \quad (11)$$

$$F_{o.cp.} = mr\omega^2. \quad (12)$$

При вращении механизма сбивания сливки внутри емкости движутся по сложным траекториям, подвергаясь воздействию центробежных и гравитационных сил. При этом в углах поворота происходят следующие процессы:

- на углах 0° и 360° (верхняя точка — начальное и конечное положение) влияние гравитационной силы минимально, тогда как центробежная сила направлена радиально от центра к периферии ёмкости;
- на углах 90° и 270° (боковые точки соответственно на правом и левом радиусах окружности) центробежная сила действует горизонтально и сливки двигаются вдоль стенок рабочей емкости;
- на угле 180° (нижняя точка) центробежная и гравитационная силы взаимодействуют и происходит максимальное накопление массы сливок перед их выбросом вверх;
- на промежуточных углах ($45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$) происходит плавный переход влияния центробежной силы в разных секторах.

Такой подход позволяет сформировать целостную картину процесса, не перегружая описание излишними подробностями [15–17]. Это распределение вращательного движения механизма сбивания рассматривается как аналог анализа динамики потока вращательно-го движения жидкости в центрифуге [18].

Поскольку ленты механизма сбивания вращаются равномерно, центробежные параметры скорость $v_{o.cp.}$ (м/с) и сила $F_{o.cp.}$ (Н) равномерно распределяются в угловом диапазоне $\theta=270^\circ \rightarrow 360^\circ$, наибольшие значения которых наблюдаются в угловом диапазоне $\theta=180^\circ \rightarrow 270^\circ$ (нижний сектор вращения). Это обусловлено воздействием силы тяжести и динамической симметрией вращательного движения. В этом секторе совмещаются направлений действия двух векторов — ускорения свободного падения и центробежного ускорения, вследствие чего результирующая скорость и сила достигают максимума. Кроме того, в этом секторе возникает динамическая симметрия между вращением механизма сбивания и распределением массы обрабатываемой среды, что усиливает центростремительные и периферийные движения, стабилизируя траекторию и увеличивая эффективность сбивания. Здесь поток сливок вследствие турбулентности и взаимодействия с поверхностями лент механизма сбивания частично замедляется и затем вновь ускоряется, в результате чего движется по сложным траекториям. Это способствует увеличению площади контакта между фазами, усилению перемешивания и ускоренному разрушению жировых оболочек при сбивании, что имеет решающее значение для эффективности технологического процесса.

На основе графика распределения скорости $v_{o.cp.}$ (м/с) и силы $F_{o.cp.}$ (Н), (Рисунок 3), можно выделить три зоны внутри рабочей емкости:

- центральная зона ($r=0 \rightarrow 0,045$ м, малый радиус, $\theta=0^\circ \rightarrow 90^\circ$) — из-за слабого воздействия центробежной силы скорость вращения здесь минимальна, наблюдается формирование участков с практически нулевыми скоростями, способствующими образованию вихревых источников;
- средняя — промежуточная зона ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний — промежуточный радиус, $\theta=90^\circ \rightarrow 270^\circ$) — здесь происходит ос-

новной круговой поток сливок, сопровождаемый локальными изменениями скорости в связи с особенностями геометрической формы ленты Мёбиуса;

- периферийная зона ($r=0,135 \rightarrow 0,180$ м, внешний радиус, $\theta=270^\circ \rightarrow 360^\circ$) при достижении пиковых значений центробежной силы и скорости вращения формируется неравномерный профиль скоростей по ширине ленты Мёбиуса. Под воздействием двух встречных потоков в этой зоне происходит активное образование масляных зерен.

По мере удаления от центра наблюдается увеличение центробежной скорости $v_{o.cp.}$ (м/с). Хотя в центральной зоне скорость остаётся на минимальном уровне, с ростом радиуса она постепенно увеличивается и достигает максимальных значений на периферии. Наивысшее значение центробежной скорости составляет $v_{o.cp.} = 12,5$ м/с при частоте вращения $n_3 = 900$ об/мин и ширине ленты $b_3 = 0,05$ м. Центробежная сила, возрастает с увеличением скорости, но снижается при уменьшении радиуса. Её максимальное значение $F_{o.cp.} = 1408,47$ Н наблюдается в периферийной зоне, где скорость достигает своего пикового значения (Рисунок 3в). Данный факт подтверждает квадратичную зависимость центробежной силы от радиуса, характерную для вращательных систем.

Путь, проходимый частицей сливок за один оборот, по мере удаления от центра к периферии увеличивается, так же увеличивается и её скорость. Соответственно, растёт и центробежная сила. Так, при $n_1 = 700$ об/мин и $b_2 = 0,04$ м в центральной зоне, ($r=0,0225$ м), первоначальный рост центробежной силы и скорости начинают увеличиваться до $v_{o.cp.} = 1,17$ м/с, $F_{o.cp.} = 102$ Н; в центре средней — промежуточной — зоны, ($r=0,09$ м), показатели доходят до $v_{o.cp.} = 4,675$ м/с, $F_{o.cp.} = 407,972$ Н, а в периферийной зоне, ($r=0,180$ м), они достигают своих максимальных значений $v_{o.cp.} = 9,35$ м/с, $F_{o.cp.} = 815,944$ Н. Таким образом, центробежные параметры увеличиваются с ростом радиуса, при этом наблюдается восьмикратный рост по сравнению с начальными значениями.

С увеличением центробежных параметров возрастает кинетическая энергия частиц сливок, а также давление, оказываемое на жировые шарики. В результате усиливается разрушение оболочек жировых шариков и наблюдается более интенсивное высвобождение жира, что и составляет основу процесса сбивания. Это обеспечивает равномерное перемешивание всего объема сливок и ускоряет слияние жировых шариков в крупные частицы. Таким образом, быстрее формируются масляные зерна с однородной структурой, сокращается время сбивания и увеличивается выход готового продукта.

На величины центробежных параметров существенное влияние оказывают как частота вращения механизма сбивания n (об/мин), так и ширина ленты b (м), (Рисунок 3). Увеличение данных параметров приводит к росту угловой скорости ω (рад/с), а также к расширению площади воздействия на сливки, что в свою очередь, вызывает рост скорости и силы. Эти изменения способствуют ускорению процесса сбивания и более эффективному высвобождению жира.

Так, например, при фиксированной ширине ленты $b_2 = 0,04$ м, увеличение частоты вращения механизма сбивания, приводит к возрастанию центробежной скорости в 1,1 → 1,3 раза, а центробежная сила увеличивается в 1,3 → 1,65 раза (квадратичная зависимость) на каждые 100 об/мин (Таблица 1, Рисунок 3).

При фиксированной частоте вращения $n_3 = 900$ об/мин и изменении ширины ленты, наблюдается рост центробежной скорости и силы в одинаковых пределах в 1,04 → 1,1 раза на каждые 0,01 м. Это указывает на сравнительно меньшую, но стабильную чувствительность параметров к ширине ленты при высоких оборотах (Таблица 2, Рисунок 3).

Таблица 1. Изменение центробежной скорости $v_{o.cp.}$ (м/с) и силы $F_{o.cp.}$ (Н), при $b_2 = 0,04$ м

Table 1. Change in centrifugal velocity $v_{o.a.}$ (m/s) and force $F_{o.a.}$ (N) at $b_2 = 0,04$ m

Параметр	$n_1 = 700$ об/мин	$n_2 = 800$ об/мин	$n_3 = 900$ об/мин
$v_{o.cp.}$ (м/с)	1,17 → 9,35	1,335 → 10,68	1,5 → 12,02
$F_{o.cp.}$ (Н)	101,993 → 815,944	133,215 → 1065,72	168,6 → 1348,81

Таблица 2. Изменение центробежной скорости $v_{o.cp.}$ (м/с) и силы $F_{o.cp.}$ (Н) при $n_3 = 900$ об/мин

Table 2. Change in centrifugal velocity $v_{o.a.}$ (m/s) and force $F_{o.a.}$ (N) at $n_3 = 900$ rpm

Параметр	$b_1 = 0,03$ м	$b_2 = 0,04$ м	$b_3 = 0,05$ м
$v_{o.a.}$ (м/с)	1,44 → 11,55	1,5 → 12,02	1,56 → 12,5
$F_{o.a.}$ (Н)	161,345 → 1290,76	168,6 → 1348,81	176,06 → 1408,47

Как частота вращения механизма сбивания n (об/мин), так и ширина ленты b (м) оказывают заметное влияние на характеристики вихревого движения сливок в емкости, выражающиеся через центробежную скорость $v_{o,cr}$, (м/с) и силы $F_{o,cr}$, (Н). Это указывает на высокую чувствительность динамических параметров к частоте вращения, что позволяет эффективно управлять интенсивностью турбулентного перемешивания и воздействием на жировые шарики при сбивании. Хотя влияние ширины не столь выражено, как частоты вращения, увеличение b (м) способствует более широкому охвату контактной зоны и потенциальному расширению активных гидродинамических областей.

Таким образом увеличение частоты вращения обеспечивает более интенсивное вихревое движение и турбулентность, в то время как увеличение ширины ленты стабилизирует и расширяет зону контакта, улучшая условия коалесценции жировых шариков и образования масляного зерна.

3.2. Турбулентные потоки

Процесс превращения сливок в сливочное масло при механическом сбивании подразумевает образование интенсивных гидродинамических потоков, стимулирующих столкновения и коалесценцию жировых шариков, что приводит к формированию устойчивых масляных зерен. Механическое воздействие на эмульсию сопровождается фазовой инверсией и перераспределением скоростей и деформаций в потоке — это непосредственно влияет на агрегацию жировых глобул [19]. Теоретические модели фазовой инверсии и динамики структуры эмульсии позволяют понять, как механическое взбивание определяет интенсивность локальных потоков и эффективность объединения глобул [20]. Дальнейшие исследования мульти-масштабного моделирования показали взаимосвязь макро-структуры масла с микро-структурой глобул и динамикой потоков при сбивании [21]. Экспериментальные работы Lars W. с соавторами [22] и Buldo P. с соавторами [23] по микро-структуре и кристаллизации жиров подтверждают, что изменение условий сбивания, времени и вязкости системы существенно влияет на частоту контактов между глобулами и эффективность их коалесценции.

При перемешивании массы в емкости формируются интенсивные вихревые потоки, обусловленные действием центробежной скорости $v_{o,cr}$, (м/с) и центробежной силы $F_{o,cr}$, (Н). Эти потоки содержат зоны ускорения, турбулентности и стагнации, и в целом характеризуются высокой неустойчивостью [24,25]. Характер и направление потока в таких условиях определяется вектором скорости, состоящим из двух взаимно перпендикулярных составляющих: горизонтальной U (м/с), отражающей скорость и направление движения вдоль радиуса вращения, и вертикальной V (м/с), отражающей скорость и направление движения вверх или вниз [26–28]. Эти составляющие играют ключевую роль в гидродинамике процесса сбивания: колебания и вариации горизонтальной и вертикальной скоростей создают локальные зоны турбулентности и сдвиговых деформаций, усиливая интенсивность столкновений жировых глобул. В результате ускоряются коалесценция и формирование устойчивых масляных зерен, так как турбулентные вихри способствуют перемешиванию, увеличению контакта между жировыми частицами и их агрегированию.

Если горизонтальная составляющая $U > 0$, то масса движется от центра вправо и, обозначается как «+ U ». Если же $U < 0$, движение массы направлено влево — к центру, то есть против радиального направления и обозначается как «- U ».

Если вертикальная составляющая $V > 0$, то масса движется вверх и ее значение обозначается как «+ V ». Если же $V < 0$, то движение массы направлено вниз — к дну емкости, и обозначается как «- V ». Наличие знаков «+» и «-» перед значениями компонентов скорости позволяет определить структуру вихревого потока.

Если одновременно $U < 0$ и $V > 0$, то масса перемещается по восходящей диагонали к центру — это указывает на восходящий закрученный и свернутый поток.

Если одновременно $U > 0$ и $V < 0$, то движение массы направлено от центра по нисходящей дуге — это свидетельствует о спиралевидной структуре потока.

С целью изучения направления и свойств вихревого потока, создаваемого механизмом сбивания, в форме двойной ленты Мёбиуса (Рисунок 1), определяются значения составляющих вектора скорости потока при различных режимах работы. На этих значениях построены графики, отражающие движения составляющих вектора скорости вихревого потока (Рисунок 4). Зная, при каких частотах вращения n (об/мин) и ширине лент b (м), составляющие вектора скорости достигают наибольших значений, возможно определить оптималь-

ные конструктивные параметры, обеспечивающие более интенсивное перемешивание, а также выявить области ускорения вихревого движения и застойные зоны.

Формирование вихревого потока обусловлено следующими факторами:

- центробежная динамика — стремление сливок под действием инерционных сил к перемещению в области окружностей, в которых происходит круговое течение;
 - турбулентность и сдвиг — наличие пересекающихся слоёв, сопровождающееся появлением горизонтальной (U) и вертикальной (V) составляющих скорости;
 - периодические колебания — циклический характер изменения угла ($0 \rightarrow 360^\circ$), вызывающий чередование знаков («+» и «-») горизонтальной и вертикальной составляющих вектора скорости.
- При всех параметрах, ($n = 700 \rightarrow 900$ об/мин и $b = 0,03 \rightarrow 0,05$ м), механизма сбивания горизонтальная (U) и вертикальной (V) составляющие вектора скорости изменяются по синусоиду, что обусловлено геометрической формой ленты Мёбиуса. С увеличением частоты вращения механизма сбивания и ширины ленты Мёбиуса траектория потока удлинняется, а вихревое течение становится более обширным и интенсивным (Рисунок 4).

Верхние пределы значений обеих составляющих наблюдались в следующих точках:

- для горизонтальной составляющей U — в точке, расположенной на самом конце периферийной зоны при $r = 0,180$ м; $\theta = 360^\circ$, что соответствует завершению полного оборота;
- для вертикальной составляющей V — в точке, расположенной в начале периферийной зоны на левом радиусе вращения при $r = 0,135$ м; $\theta = 270^\circ$.

Нижние пределы ($0 \rightarrow 1$ м/с) обеих составляющих наблюдались в следующих точках:

- для горизонтальной составляющей U — в центральной зоне, начиная от точки с координатами $r = 0,0 \rightarrow 0,045$ м; $\theta = 0^\circ \rightarrow 90^\circ$, расположенной в начальной позиции по правому радиусу вращения, а также в точке с координатами $r = 0,135$ м; $\theta = 270^\circ$, находящейся в начале периферийной зоны по левому радиусу вращения;
- для вертикальной составляющей V — в центральной зоне при $r = 0,0 \rightarrow 0,0225$ м; $\theta = 0^\circ \rightarrow 45^\circ$ (начальная позиция оборота), в средней — переходной зоне при $r = 0,09$ м; $\theta = 180^\circ$ (нижняя точка окружности), а также в точке $r = 0,180$ м; $\theta = 360^\circ$ на завершении полного оборота, что соответствует концу периферийной зоны.

Таким образом горизонтальная составляющая вектора скорости достигает своих максимальных показателей на периферии, минимальных в центре, в то время как вертикальная составляющая V ($r < 0,045$ м) имеет сложное пространственное распределение с экстремумами в специфических точках. При таких обстоятельствах в центральной зоне доминирует ламинарный режим, а в периферийной зоне ($r > 0,135$ м) развивается турбулентность.

Направление горизонтальной составляющей изначально ориентировано от центра к стенке емкости (вправо) и на графическом изображении обозначается как «+ U » по положительному направлению оси. Это наблюдается по всей центральной зоне ($r = 0 \rightarrow 0,045$ м, малый радиус, $\theta = 0 \rightarrow 90^\circ$). В данной области, вследствие слабого влияния центробежной силы, центробежная скорость имеет низкие значения, и эта зона считается областью нулевых скоростей, где формируются источники вихреобразования.

При частотах вращения рабочего механизма $n = 700 \rightarrow 800$ об/мин значение горизонтальной составляющей U в центральной зоне составляет $0 \leq U < 1$, тогда как при $n_3 = 900$ об/мин в центральной точке этой зоны ($r = 0,0225$ м; $\theta = 45^\circ$) уже наблюдается значение $U \geq 1$. Увеличение горизонтальной составляющей U в центральной области происходит в направлении к её геометрическому центру ($r = 0,0225$ м) и в переходной угловой зоне $\theta = 45^\circ$, где влияние центробежной силы начинает мягко распространяться на соседние области. После этого наблюдается повторное снижение значения скорости. Эта зона характеризуется как область пророста скорости и представляет собой статический круговой поток, охватывающий центральную часть, внешнюю поверхность вихревого (турбулентного) потока, а также всю поверхность механизма сбивания (Рисунок 4).

Значение горизонтальной составляющей U в средней зоне ($r = 0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний радиус, $\theta = 90 \rightarrow 270^\circ$) приобретает качества параболоида и направлено к центру (влево), что на графическом изображении обозначается как «- U » по отрицательному направлению оси. В этой области, на фоне увеличения окружной скорости, происходит основная циркуляция сливок, при этом вследствие геометрических особенностей формы ленты Мёбиуса наблюдаются локальные изменения скорости. Так, вплоть до центральной точки

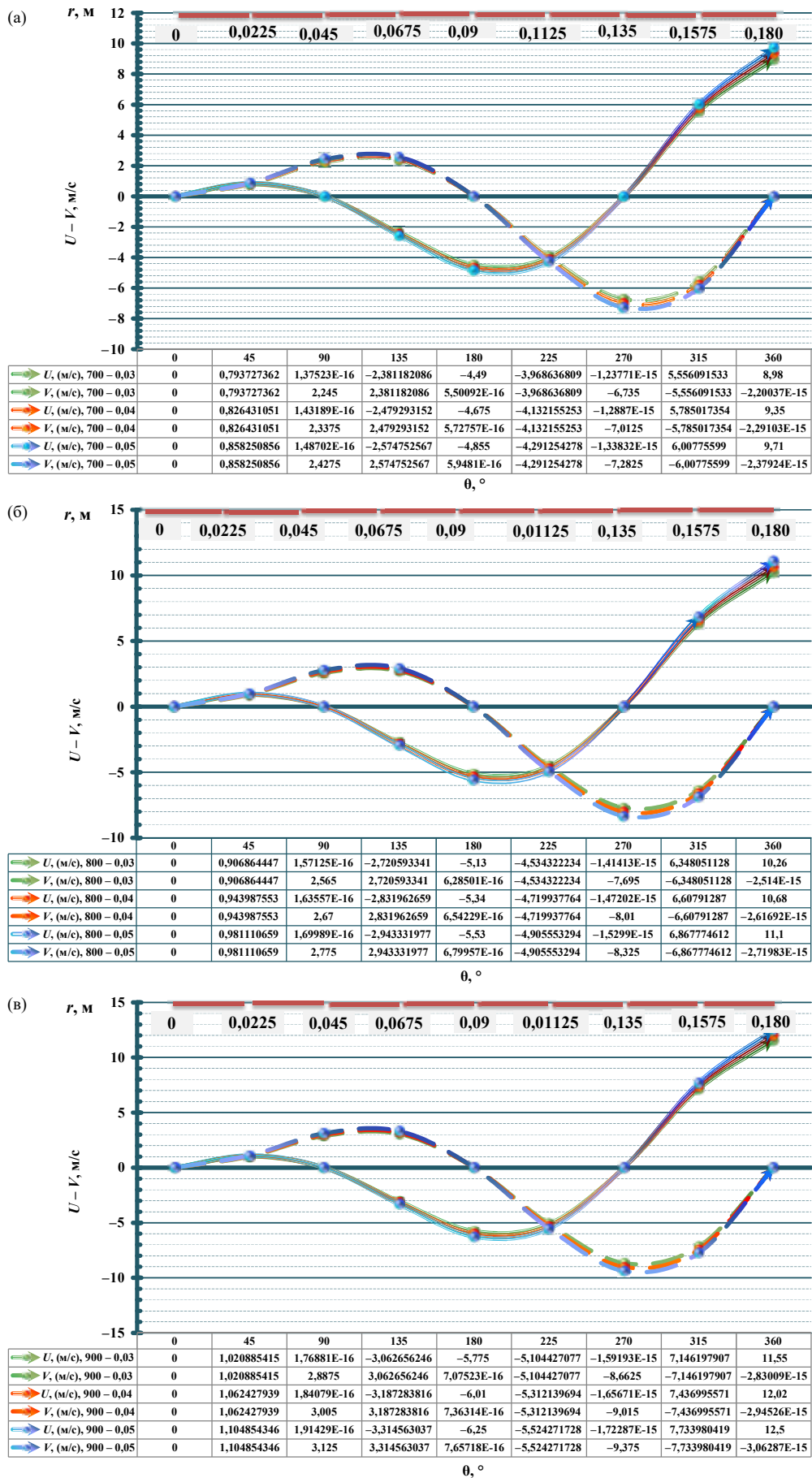


Рисунок 4. Характер движения горизонтальной (U) и вертикальной (V) составляющих вектора скорости вихревого потока сливок в емкости в зависимости от n (об/мин) и b (м): (а) $n_1 = 700$ об/мин; (б) $n_2 = 800$ об/мин; (в) $n_3 = 900$ об/мин)
 Figure 4. Flow characteristics of the horizontal (U) and vertical (V) components of the velocity vector of the cream's vortex motion in the container depending on n (rpm) and b (m): а) $n_1 = 700$ rpm; б) $n_2 = 800$ rpm; в) $n_3 = 900$ rpm)

зоны ($r=0,09$ м, $\theta=180^\circ$), поток направлен к центру емкости с нарастающей скоростью, после чего происходит снижение скорости до значений, приближающихся к нулю, на самом конце средней зоны. Эта область считается зоной перехода к типу динамического кругового потока с нарастающей окружной скоростью. Здесь также происходит изменение направления движения потока за счёт слияния встречных потоков, что вызывает резкие колебания скорости — как падение, так и последующий подъём. После смены направления (вправо — от центра к стенкам емкости и к ее дну), на графике оно вновь обозначается как «+U» по положительному направлению оси, поток входит в периферийную зону ($r=0,135 \rightarrow 0,180$ м, внешний радиус, $\theta=270 \rightarrow 360^\circ$), где достигается максимум центробежной силы и наблюдается интенсивное взаимодействие двух встречных потоков. В результате этого вдоль ширины ленты Мёбиуса формируется неравномерный профиль скоростей. Эта зона определяется как область динамического кругового потока, где горизонтальная составляющая U резко возрастает и достигает своего максимального значения в конце периферийной зоны ($r=0,180$ м, $\theta=360^\circ$). Здесь поток с ударом сталкивается со стенками емкости. Данная область характеризуется наибольшим градиентом скорости и является зоной формирования устойчивых вихревых полос и центров зарождения масляных зёрен, а также рассматривается как пограничный подслои (Рисунок 4).

Направление вертикальной составляющей вектора скорости V изначально ориентировано вверх, что на графическом изображении обозначается как «+V» по отрицательному направлению оси. В данном направлении увеличение скорости происходит сначала в центральной зоне ($r=0 \rightarrow 0,045$ м, малый радиус, $\theta=0 \rightarrow 90^\circ$), где влияние центробежной силы слабо выражено и формируются источники вихрей. Рост продолжается до центральной части средней зоны ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний радиус, $\theta=90 \rightarrow 270^\circ$), где под влиянием увеличивающейся окружной скорости и геометрических особенностей формы ленты Мёбиуса наблюдаются локальные изменения скорости. В этой области поток плавно переходит от стационарного кругового потока к динамическому. Увеличение вертикальной составляющей V продолжается вплоть до точки с координатами $r=0,0675$ м, $\theta=135^\circ$, где достигается её максимальное значение в результате мягкого перехода воздействия центробежной силы на разные зоны емкости. После этого, в центральной точке переходной зоны — в нижней точке окружности ($r=0,09$ м, $\theta=180^\circ$), происходит снижение скорости до значений, приближающихся к нулю. В этой точке, из-за слияния потоков, происходит смена направления движения, что вызывает одновременно резкое падение и последующий подъём скорости (Рисунок 4).

Вертикальная составляющая вектора скорости V от центральной точки средней зоны ($r=0,09$ м, $\theta=180^\circ$) до конца периферийной зоны ($r=0,135 \rightarrow 0,180$ м, внешний радиус, $\theta=270 \rightarrow 360^\circ$) приобретает форму параболоида и направляется вниз, к дну емкости. На графическом изображении это обозначается как «-V» по отрицательному направлению оси. В данном направлении вертикальная составляющая V достигает своего наивысшего значения в начале периферийной зоны — в точке, расположенной на левом радиусе вращения ($r=0,135$ м, $\theta=270^\circ$). Затем она снижается до значений, приближающихся к нулю, в точке завершения полного оборота ($r=0,180$ м, $\theta=360^\circ$) в конце периферийной зоны (Рисунок 4).

Резкие колебания в значениях вертикальной составляющей V при направленном вверх и вниз потоке обусловлены следующим факторами:

- в первом случае — взаимодействием на границе между центральной зоной ($r=0 \rightarrow 0,045$ м, малый радиус, $\theta=0 \rightarrow 90^\circ$), где происходит формирование вихревых источников при нулевых скоростях, и средней зоной ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний радиус, $\theta=90 \rightarrow 270^\circ$), где реализуется основная циркуляция с увеличивающейся окружной скоростью;
- во втором случае — взаимодействием на границе между средней зоной ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний радиус, $\theta=90 \rightarrow 270^\circ$), где

также наблюдается основная циркуляция и периферийной зоной ($r=0,135 \rightarrow 0,180$ м, внешний радиус, $\theta=270 \rightarrow 360^\circ$), в которой центробежная скорость и сила достигает своего пикового значения. В обоих случаях причиной колебаний является взаимное влияние двух потоков, направленных навстречу друг другу.

При всех параметрах рабочего механизма ($n=700 \rightarrow 900$ об/мин, $b=0,03 \rightarrow 0,04$ м), выполнение условий $U>0$, $V>0$ и $V>U$ в центральной зоне ($r=0 \rightarrow 0,045$ м, малый радиус, $\theta=0 \rightarrow 90^\circ$) указывает на более быстрое прямолинейное движение потока снизу вверх и от центра к стенкам емкости. Изменение направления вектора скорости в сторону $U<0$ и $V>0$ в направлении к центру средней зоны ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний радиус, $\theta=90 \rightarrow 270^\circ$) указывает на восходящее диагональное движение потока, закрученного по направлению к центру. В промежутке от центра до конца средней зоны ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, $\theta=90 \rightarrow 270^\circ$) наблюдаются условия $U<0$, $V<0$ и $V>U$, что свидетельствует о более интенсивном движении потока сверху вниз и к центру. В конце периферийной зоны ($r=0,135 \rightarrow 0,180$ м, внешний радиус, $\theta=270 \rightarrow 360^\circ$) условия $U>0$ и $V<0$ отражают нисходящее дугообразное движение потока от центра к стенкам, что является элементом спиралевидного потока.

4. Выводы

Таким образом, теоретические исследования, направленные на изучение гидродинамики процесса взбивания сливок в аппарате с рабочим органом типа ленты Мёбиуса позволили сделать следующие выводы:

1. За счёт наивысшей частоты вращения рабочего механизма $n_3=900$ об/мин и ширины ленты $b_3=0,05$ м достигаются максимальные значения центробежной скорости $v_{o,cr.}=12,5$ м/с и центробежной силы $F_{o,cr.}=1408,5$ Н, что позволит обеспечить более быстрый и эффективный процесс сбивания;
2. При минимальной частоте вращения рабочего механизма $n_1=700$ об/мин и ширине ленты $b_1=0,03$ м достигаются наименьшие значения центробежной скорости $v_{o,cr.}=8,98$ м/с и силы $F_{o,cr.}=708,8$ Н, что соответствует режиму сбивания с пониженной интенсивностью гидродинамического воздействия;
3. При средней частоте вращения рабочего механизма $n_2=800$ об/мин и ширине ленты $b_2=0,04$ м достигаются средние значения центробежной скорости $v_{o,cr.}=12,5$ м/с и силы $F_{o,cr.}=1065,72$ Н, что обеспечивает равномерное распределение гидродинамического воздействия на перерабатываемый продукт и повышение интенсивности сбивания без формирования локальных зон чрезмерного воздействия;
4. Изучение движения горизонтальной (U) и вертикальной (V) составляющих вектора скорости показало, что при всех параметрах рабочего механизма ($n=700 \rightarrow 900$ об/мин, $b=0,03 \rightarrow 0,05$ м) они достигают своих максимальных значений в периферийной зоне, что указывает на наличие интенсивной циркуляции и рециркуляции вдоль внешнего контура рабочей емкости;
5. Изменения количественных показателей, составляющих вектора скорости их траекторий движения, чередование положительных и отрицательных значений указывают на наличие встречных (обратных) потоков, которые будут способствовать более эффективному перемешиванию жировых шариков и разрушению их оболочек. Это обеспечит интенсификацию перемешивания жировых шариков и усиление механического воздействия на их оболочки, обеспечивая вовлечение всего объёма обрабатываемой массы в процесс гидродинамического взаимодействия и тем самым ускоряя процесс сбивания;
6. Повышение частоты вращения обеспечивает более интенсивное вихревое движение и турбулентность, в то время как увеличение ширины ленты позволит стабилизировать и расширить зону контакта, улучшая условия коалесценции жировых шариков и образования масляного зерна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/REFERENCES

1. Кулиев, З. В., Якубов, К. Г., Алиев, Э. М. (2024). Влияние параметров сбивания на некоторые свойства пахты и масла, получаемого из йогурта. *Молочнохозяйственный вестник*, 3(55), 156–171. [Kuliev, Z.V., Yakubov, K. G., Aliev, E. M. (2024). Effect of churning parameters on certain properties of buttermilk and butter developed from yogurt. *Molochnokhozaystvenny Vestnik*, 3(55), 156–171. (In Russian)] https://doi.org/10.52231/2225-4269_2024_3_156
2. Арсеньева, Т. П. (2013). Технология сливочного масла. СПб.: НИУИТМО; ИХиБТ, 2013. [Arsenieva, T. P. (2013). *Butter technology*. St. Petersburg: National Research University; Institute of Refrigeration and Biotechnology, 2013. (In Russian)]
3. Гогаев, О. К., Караева, З. А., Кадиева, Т. А., Моргоева, Д. Г. (2024). Технология молока и молочных продуктов. СПб.: Лань, 2024. [Gogaev, O. K., Karaeva, Z. A., Kadieva, T. A., Morgoeva, D. G. (2024). *Technology of milk and dairy products*. St. Petersburg: Lan, 2024. (In Russian)]

4. Бирюкова, Е. А., Лазуткина, С. А. (7–8 февраля, 2017). Анализ существующих положений теорий сбивания сливок и образования масляного зерна. Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы VIII Международной научно-практической конференции. Ульяновск: УГС-ХА им. П. А. Столыпина, 2017. [Biryukova, E. A., Lazutkina, S. A. (February 7–8, 2017). *Analysis of existing provisions of the theories of cream churning and butter grain formation*. Agrarian science and education at the modern stage of the development: Experience, problems and ways of their solution: Proceedings of the 8th International scientific-practical conference. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P. A. Stolypin, 2017. (In Russian)]
5. Твердохлеб, Г. В., Сажинов, Г. Ю., Раманаускас, Р. И. (2006). Технология молока и молочных продуктов. М.: ДеЛи принт, 2006. [Tverdokhle, G. V., Sazhinov, G. Yu., Ramanauskas, R. I. (2006). *Technology of milk and dairy products*. Moscow: DeLi print, 2006. (In Russian)]
6. Яшин, А. В., Полювяный, Ю. В. (2019). Результаты лабораторных исследований маслоизготовителя с гибким виброприводом. *Нива Поволжья*, (3(52)), 177–183. [Yashin, A. V., Polyvyany, Yu. V. (2019). The results of laboratory studies of the butter maker with a flexible vibration drive. *Niva Povolzhya*, (3(52)), 177–183. (In Russian)]
7. Yashin, A., Polyvyannii, Y. (2020). Results of research on justification of the device for producing ecologically pure butter. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 63(1), 632–636.
8. Aljaafreh, A., Al-Tahiri, R., Abadleh, A., Mansour, A. M., Alaqtash, M. (2019). Design and development of an automated and quality controlled system for traditional butter and ghee production. *Wseas Transactions on Environment and Development*, 15, 478–484.
9. Kalla, A. M., Sahu, C., Agrawal, A. K., Bisen, P., Chavhan, B. B., Sinha, G. (2016). Development and performance evaluation of frustum cone shaped churn for small scale production of butter. *Journal of Food Science and Technology*, 53(5), 2219–2226. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2110-y>
10. Лазуткина, С. А., Миннибаев, М. Р. (20–21 июня, 2018). Маслоизготовитель периодического действия. Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию Ульяновского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина. Ульяновск: УлГАУ, 2018. [Lazutkina, S. A., Minnibaev, M. R. (June 20–21, 2018). *Batchoil-manufacturer*. Agrarian science and education at the modern stage of the development: Experience, problems and ways of their solution: Proceedings of the 9th International scientific-practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Agrarian University, 2018. (In Russian)]
11. Ebrahimi, M., Khoshnam, F., Kamandar, M. R., Namjoo, M. (2024). Development and performance evaluation of machine-type reciprocating churning. *Biomechanism and Bioenergy Research*, 3(2), 108–116. <https://doi.org/10.22103/BBR.2024.22972.1080>
12. Wang, M., Lu, J., Li, Z., Gu, F., Chen, Z. (2023). Study on the unsteady characteristics and radial force of a single-channel centrifugal pump. *ACS Omega*, 8(2), 2291–2305. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06614>
13. Cao, W., Mao, J., Li, W. (2020). Analysis of unsteady pressure fluctuation in a semi-open cutting pump. *Energies*, 13(14), Article 3657. <https://doi.org/10.3390/en13143657>
14. Kang, Y., Liu, S., Zou, W., Hu, X. (2019). Numerical investigation on pressure pulsation characteristics and radial force of a deep-sea electric lifting pump at off-design conditions. *Shock and Vibration*, 2019(1), Article 4707039. <https://doi.org/10.1155/2019/4707039>
15. Diehl, E. (2021). Non-rectangular coordinate systems: Polar coordinates. Chapter in a book: *The Engineering Dynamics Course Companion, Part 1: Particles*. Synthesis Lectures on Mechanical Engineering, Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-031-79677-7_6
16. Lee, G., Kim, W. (2024). Image processing in L^1 -norm-based discrete Cartesian and polar coordinates. *Electronics*, 13, Article 1088. <http://doi.org/10.3390/electronics1301088>
17. Zhu, J., Wang, Y., Gao, F., Zhang, Z. (2023). Optical differentiation in a polar coordinate system. *Applied Physics Letters*, 122(9), Article 091107. <https://doi.org/10.1063/5.0140272>
18. Walstra, P., Wouters, J. T. M., Geurts, T. J. (2005). Centrifugation. Chapter in a book: *Dairy science and technology*. CRC Press, 2005.
19. Panchal, B., Truong, T., Prakash, S., Bansal, N., Bhandari, B. (2021). Influence of emulsifiers and dairy ingredients on manufacturing, microstructure, and physical properties of butter. *Foods*, 10(5), Article 1140. <https://doi.org/10.3390/foods10051140>
20. Nozawa, E., Deguchi, T. (2025). Simulating phase inversion processes by coupled map lattice: Towards the theoretical design of food texture and quality in dairy processing from fresh cream to butter via whipped cream. *Journal of Chemical Physics*, 162, Article 064902. <https://doi.org/10.1063/5.0251375>
21. Nozawa, E. (2026). Theoretical relationship between the macro texture and micro structure in dairy processing revealed by the multi scale simulation of coupled map lattice. *arXiv*, 1, Article 15051. <https://arxiv.org/abs/2601.15051>
22. Lars, W., De Graef, V., Rasmussen, M., Dewettinck, K. (2009). Relations between crystallisation mechanism and microstructure of milk fat. *International Dairy Journal*, 19(8), 424–430. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.03.003>
23. Buldo, P., Kirkensgaard, J. J. K., Wiking, L. (2015). Crystallization mechanisms in cream during ripening and initial butter churning. *Journal of Dairy Science*, 96(11), 6782–6791. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6066>
24. Бронштейн, И. Н., Семендяев, К. А. (1986). Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. [Bronstein, I. N., Semendyayev, K. A. (1986). *Handbook of mathematics for engineers and students of technical universities*. Moscow: Nauka, 1986. (In Russian)]
26. Serway, R. A., Jewett, J. W. (2018). *Physics for scientists and engineers with Modern Physics* (10th ed.). Cengage Learning, 2018.
27. Hibbeler, R. C. (2016). *Engineering mechanics: Dynamics* (14th ed.). Pearson, 2015.
28. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. (1988). Теоретическая физика: Том 1. Механика. М.: Наука, 1988. [Landau, L. D., Lifshitz, E. M. (1988). *Theoretical physics: Volume 1. Mechanics*. Moscow: Nauka, 1988. (In Russian)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Кулиев Закир Вагиф Оглы — заведующий лабораторией «Механизация и автоматизация технологических процессов в животноводстве», Научно-исследовательский институт «Агромеханика» Азербайджан, Гянджа, пр. Азиз Алиев, 93 E-mail: vaqifizz@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6090-1853 * автор для контактов</p>	<p>Zakir V. Guliev, Head of the Laboratory for «Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry», «Agromechanics» Research Institute 93, Aziz Aliyev Ave., Ganja, Azerbaijan E-mail: vaqifizz@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6090-1853 * corresponding author</p>
<p>Якубов Камал Гаджи Оглы, — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория «Механизация и автоматизация технологических процессов в животноводстве», Научно-исследовательский институт «Агромеханика» Азербайджан, Гянджа, пр. Азиз Алиев, 93 E-mail: yaqubov.k@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0005-1426-5581</p>	<p>Kamal H. Yakubov, Candidate of Technical Sciences, Docent, Leading Researcher, Laboratory for «Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry», «Agromechanics» Research Institute 93, Aziz Aliyev Ave., Ganja, Azerbaijan E-mail: yaqubov.k@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0005-1426-5581</p>
<p>Алиев Эльман Мухтар Оглы, старший научный сотрудник, лаборатория «Механизация и автоматизация технологических процессов в животноводстве», Научно-исследовательский институт «Агромеханика» Азербайджан, Гянджа, пр. Азиз Алиев, 93 E-mail: bozhan@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5371-2667</p>	<p>Elman M. Aliev, Senior Researcher, Laboratory for «Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry», «Agromechanics» Research Institute 93, Aziz Aliyev Ave., Ganja, Azerbaijan E-mail: bozhan@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5371-2667</p>
Критерии авторства	Contribution
<p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.</p>	<p>Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.</p>
Конфликт интересов	Conflict of interest
<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>	<p>The authors declare no conflict of interest.</p>

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-98-105>



Received 23.08.2025

Accepted in revised 15.03.2026

Accepted for publication 18.03.2026

© Siminiuc R., Țurcanu, D., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

FRESH ELDERBERRY OR SPINACH PURÉES AS DUAL NATURAL COLOUR AND EARLY TEXTURE MODULATORS IN SORGHUM GLUTEN-FREE BREAD

Rodica Siminiuc*, Dinu Țurcanu

Technical University of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova

KEYWORDS:

acceptability, clean-label, consumer test, principal component analysis, texture profile analysis

ABSTRACT

Gluten-free breads typically exhibit rapid firming and limited natural color diversity, which issues are usually addressed through multiple additives. This study evaluated the properties of adding fresh elderberry (*Sambucus nigra*) and spinach (*Spinacia oleracea*) purées (15–35%, flour basis) as multifunctional ingredients for sorghum (*Sorghum oryzoidum*) gluten-free bread. Nine bread recipes were analysed for their instrumental texture, crumb CIELAB color, sensory profile, and consumer acceptability at 6 h and 24 h post-baking. At 6 h, bread with added spinach puree at 35% achieved wheat-like softness, while bread with added elderberry puree increased crumb firmness. After 24 h, all breads firmed, but bread with added 35% of spinach puree remained substantially softer than the sorghum reference sample. Elderberry purée shifted crumb color towards red-violet hues, spinach puree did it towards green-yellow hues, while the variants of bread with added spinach showed the lowest 24 h color change ($\Delta E^*ab < 3.5$). Consumer scores were consistently high (≥ 7.0 on day 1), with 35% elderberry-enriched bread which retained the highest liking rating after 24 h. These findings demonstrate that fresh plant purées can expand natural colours diversity and attenuate early firming in gluten-free bread, supporting their application as clean-label alternatives to the conventional additives.

FUNDING: This work was supported by the National Agency for Research and Development (NARD), Republic of Moldova, through the research project "Exploratory analysis of food security in the Republic of Moldova based on metrics of sustainable and nutritional quality (SNuQ) of food products" (grant No. 23.70105.5107.05), implemented at the Technical University of Moldova.

Поступила 23.08.2025

Поступила после рецензирования 15.03.2026

Принята в печать 18.03.2026

© Симениук Р. И., Цуркану Д. Н., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ПЮРЕ ИЗ СВЕЖИХ ЯГОД БУЗИНЫ ИЛИ ПЮРЕ ИЗ ШПИНАТА КАК ДВОЙНОЙ НАТУРАЛЬНЫЙ КРАСИТЕЛЬ И МОДУЛЯТОРЫ КОНСИСТЕНЦИИ СОРГОВОГО БЕЗГЛЮТЕНОВОГО ХЛЕБА НА РАННИХ СРОКАХ ПОСЛЕ ВЫПЕЧКИ

Симениук Р. И.*, Цуркану Д. Н.

Технический Университет Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

приемлемость, природные ингредиенты, подпадающие под определение «чистая этикетка», потребительская оценка, анализ основных компонентов, анализ профиля консистенции

Безглютеновый хлеб обычно быстро черствеет и имеет ограниченное разнообразие природных цветов, что, как правило, исправляется многочисленными добавками. В этой статье оцениваются свойства пюре из свежих ягод бузины (*Sambucus nigra*) и шпината (*Spinacia oleracea*) (15–35% от количества муки), примененных в качестве многофункциональных ингредиентов для безглютенового хлеба, выпеченного из сорго (*Sorghum oryzoidum*). Был проведен анализ девяти рецептов, где инструментально оценивалась консистенция, цвет мякиша по шкале цвета CIELAB, профиль органолептических свойств и уровень потребительской приемлемости через 6 и 24 часа после выпечки. Через 6 часов хлеб с добавлением шпината в количестве 35% достиг уровня мягкости, сравнимого с пшеничным хлебом, в то время как добавленная бузина повысила черствость мякиша. Через 24 часа все виды хлеба зачерствели, но хлеб, испеченный с добавлением шпината в количестве 35%, оставался значительно мягче, нежели контрольный образец, выпеченный из сорго. Пюре из ягод бузины изменило цвет хлебного мякиша в сторону красно-фиолетовых оттенков, пюре из шпината — в сторону зелено-желтого оттенка, при этом варианты рецепта с добавленным шпинатом показали наименьшее изменение цвета через 24 часа ($\Delta E^*ab < 3,5$). Потребительские оценки были неизменно высокими ($\geq 7,0$ в первый день), при этом хлеб с добавлением 35% бузины сохранил наивысшую оценку и через 24 часа. Эти результаты показывают, что применение пюре из свежих растительных материалов способно расширить естественное разнообразие цвета и уменьшить преждевременное черствение безглютенового хлеба, что подтверждает целесообразность их применения в качестве альтернативы традиционным добавкам, подпадающим под определение «чистая этикетка».

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья была выполнена при поддержке Национального агентства по исследованиям и разработкам (NARD) Республики Молдова в рамках исследовательского проекта «Исследовательский анализ продовольственной безопасности в Республике Молдова на основе показателей экологической чистоты и питательной ценности (SNuQ) пищевых продуктов» (грант № 23.70105.5107.05), реализуемого в Техническом университете Молдовы.

FOR CITATION: Siminiuc, R., Turcanu, D. (2026). Fresh elderberry or spinach purées as dual natural colour and early texture modulators in sorghum gluten-free bread. *Food Systems*, 9(1), 98–105. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-98-105>

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Симениук, Р. И., Цуркану, Д. Н. (2026). Пюре из свежих ягод бузины или пюре из шпината как двойной натуральный краситель и модуляторы консистенции соргового безглютенового хлеба на ранних сроках после выпечки. *Пищевые системы*, 9(1), 98–105. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-98-105>

1. Introduction

The gluten-free (GF) bread market has been expanding steadily, driven by the diagnostics of celiac disease and non-celiac gluten sensitivity, as well as by voluntary adoption of “clean” foods or perceived healthier diets among non-celiac consumers [1,2]. Yet GF breads still lag behind wheat analogues in three persistent quality domains: crumb openness, early (first 24 h) firmness kinetics and naturally appealing color diversity, which together influence repurchase behavior [3–6]. Current technological optimization commonly relies on cumulative “packages” of hydrocolloids (xanthan, psyllium), refined starches, emulsifiers and enzyme systems; for visual differentiation, added colorants or processed extracts are frequently used [3,7–10]. While effective for volume or softness stabilization, this multi-additive reliance can lengthen ingredient lists and erode clean-label positioning, increasingly valued in free-from-artificial ingredients products [11,12]. These pressures motivate interest in whole, recognizable plant ingredients able to contribute both technical & functional (hydration, matrix support) and sensory (natural color) parameters.

Sorghum flour is a relevant GF platform due to its gluten absence, starch functionality and phenolic potential, though unaided it can yield compact crumb and limited elasticity [13,14]. The local hybrid *Sorghum oryzoidum* (“soryz”) – featuring pale kernels, neutral taste, and a moderate protein content (approximately 10%) – adds specific advantages: (i) a light, neutral crumb matrix that accentuates pigment contributions from added plant purées; (ii) valorization of an underutilized regional resource; (iii) distribution of compatible proteins fractions (albumins, globulins and glutelins) with forming a stable matrix in the presence of hydrocolloids [15,16].

Elderberry (*Sambucus nigra*) fruits, abundant and under-exploited locally, supply anthocyanins (cyanidin derivatives, including acylated forms), phenolics and simple sugars with intense red–violet dyeing capacity [17]. Using fresh integral purée rather than extracts or powders retains fibers, pectins and organic acids that may manage water distribution and engage in weak hydrogen bonding or aromatic stacking with polysaccharides/hydrocolloids – mechanisms proposed (not directly confirmed here) to influence early crumb microstructure [18,19].

Spinach (*Spinacia oleracea*) purée contributes chlorophylls, carotenoids (lutein, β-carotene), predominantly insoluble fibers (plus a soluble fraction), vitamins and moderate phenolic levels [20], providing a green – yellow hues palette complementary to the red – violet elderberry spectrum without using of any synthetic colorants. Cellular inclusions and fibers may dissipate localized mechanical stress during baking/cooling, this way potentially supporting acceptable chewiness without increasing perceived density [21].

Literature gaps still persist: many GF enrichment studies use pigment extracts or dried powders, or examine a single botanical kind while processing texture or color in isolation [22]. Integrated evidence is scarce for two fresh, unpasteurized plant purées with complementary pigment spectra – under-utilized *S. nigra* and accessible *S. oleracea* – applied at graded inclusion levels (15–35%) in a neutral *S. oryzoidum* matrix with

concurrent evaluation of early instrumentally tested texture (6 h/24 h TPA), measuring of colour by CIELAB (including Δ over 24 h), descriptive sensory profile and consumer acceptability within the initial freshness window.

The objective of this study was to determine whether fresh elderberry and spinach purées, used at 15–35% inclusion levels, can simultaneously improve early crumb texture and broaden natural color diversity in sorghum-based gluten-free bread. Novel contributions include: (a) dual valorization of a spontaneous local resource and a widely accessible horticultural species as unpasteurized whole purées; (b) establishment of a bidirectional natural color platform (red–violet vs. green – yellow) within a neutral sorghum matrix; (c) integrated multidimensional (texture – color – sensory) assessment focused on the early staling window; and (d) orientation toward reducing reliance on added colorants and auxiliary functional ingredients consistent with clean-label objectives.

2. Materials and methods

The study compared nine bread recipes: one wheat-based bread (WB) used as reference sample, two gluten-free control sample formulations based on sorghum flour [S-GFB and S-GFB+CS], and six gluten-free variants enriched with graded levels (15, 25, 35% w/w of flour basis) of *S. nigra* or *S. oleracea* purée. All bread samples were prepared at laboratory scale in the Department of Food and Nutrition at the Technical University of Moldova under identical processing conditions, as described in Section 2.2.

Instrumental evaluations (Texture Profile Analysis and CIELab color measurement) and sensory assessments were performed at 6.0±0.5 h (after complete cooling to 23±1 °C) and 24.0±0.5 h post-baking. The fruits of *S. nigra* were manually harvested at full ripeness (September 2024) from wild stands in Florești district (Republic of Moldova). After removal of the pedicels, the fruits were rinsed with potable water, drained, and homogenized using a laboratory blender, then passed through a 0.5 mm mesh stainless-steel sieve to remove the seeds. Fresh leaves of *S. oleracea* were purchased in September 2024 from the local growers at the central agricultural market. After rejecting damaged leaves, they were washed, drained, and blended with potable water at a 4:1 ratio (leaf mass: water, w/w) to obtain a smooth, particle-free purée. The purées were used immediately after preparation, unpasteurized, without freezing or storage longer than 1 h.

2.1. Sample formulation

The detailed compositions of all samples (wheat-based reference sample, gluten-free control samples based on sorghum flour, and purée-fortified gluten-free variants) are presented in the Table 1, expressed both as grams per batch and baker’s percentage (values in parentheses; flour basis = 100 g total cereal solids). The nine formulations comprised WB (wheat-based reference sample), S-GFB (sorghum-based gluten-free control sample), S-GFB+CS (sorghum-based gluten-free dilution control samples with corn starch), and six purée-fortified variants prepared with

Table 1. Formulation of control and gluten-free breads enriched with *S. nigra* or *S. oleracea* purée: absolute amounts per batch (g) and baker’s percentages (g (%), values in parentheses = baker’s % w/w relative to 100 g total cereal solids)

Таблица 1. Рецептатура контрольного образца хлеба и безглютенового хлеба, обогащенного пюре из *S. nigra* или *S. oleracea*: абсолютное количество добавок на партию (г) и пекарский процент (г (%), значения в скобках = пекарский процент в весовом выражении относительно 100 г общего содержания сухих зерновых веществ)

Ingredients	WB	S-GFB	S-GFB+CS	S-GFB+SN 15%	S-GFB+SN 25%	S-GFB+SN 35%	S-GFB+SO 15%	S-GFB+SO 25%	S-GFB+SO 35%
Water	120 (60%)	200 (100%)	200 (100%)	220 (110%)	200 (100%)	200 (100%)	190 (95%)	180 (90%)	170 (85%)
Sour cream (20% fat)	70 (35%)	70 (35%)	70 (35%)	70 (35%)	70 (35%)	70 (35%)	70 (35%)	70 (35%)	70 (35%)
<i>S. nigra</i> purée	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	30 (15%)	50 (25%)	70 (35%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
<i>S. oleracea</i> purée	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	30 (15%)	50 (25%)	70 (35%)
Sugar	10 (5%)	10 (5%)	10 (5%)	10 (5%)	10 (5%)	10 (5%)	10 (5%)	10 (5%)	10 (5%)
Dry yeast	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)
Salt	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)
Xanthan gum	0 (0%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)
Psyllium powder	0 (0%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)	4 (2%)
Baking powder	0 (0%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)	3 (1.5%)
Wheat flour	200 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Sorghum flour	0 (0%)	200 (100%)	100 (50%)	100 (50%)	100 (50%)	100 (50%)	100 (50%)	100 (50%)	100 (50%)
Corn starch	0 (0%)	0 (0%)	100 (50%)	100 (50%)	100 (50%)	100 (50%)	100 (50%)	100 (50%)	100 (50%)
Total (g)	407	498	498	548	548	568	518	528	538

Legend: WB = wheat-based bread (reference sample); S-GFB = sorghum-based gluten-free bread (gluten-free control sample); S-GFB+CS = sorghum-based gluten-free bread with added corn starch (dilution degree control sample); SN15, SN25, SN35 = S-GFB+CS formulations containing 15, 25, and 35% *S. nigra* purée, respectively; SO15, SO25, SO35 = S-GFB+CS formulations containing 15, 25, and 35% *S. oleracea* purée, respectively. Percentages are expressed on flour basis.

graded levels (15, 25, and 35 %, w/w of flour basis) of *S. nigra* (SN15, SN25, SN35) or *S. oleracea* (SO15, SO25, SO35).

To ensure process consistency, the amount of added water was adjusted according to volume of purée adding and moisture contribution in order to maintain comparable dough consistency across formulations. Accordingly, added water varied inversely with added purée volume, particularly for the higher-moisture *S. oleracea* purée (in this recipe the water volume was accordingly reduced to maintain target dough consistency). The ingredients common to all recipes (2 % dry yeast, 5 % sugar, 1.5 % salt, 2 % xanthan gum, 2 % psyllium powder, 1.5 % baking powder; baker's %) remained unchanged. Each recipe was prepared in triplicate, with one batch per day over three consecutive days, each batch representing an independent experimental unit. Ingredients were weighed using a precision scales (model XE PLUS-600R, CAS Corporation, China).

2.2. Technological process

The dry phase (flour, starch, salt, sugar, yeast, hydrocolloids, baking powder) and the liquid phase (water, sour cream, vegetable purée) were homogenized separately, then combined and mixed for 2.0 min at speed 3 (medium) using an Electrolux Speedy Mixer (model SPEEDY250, 0.25 kW, Electrolux, Italy), maintaining a total solids-to-water ratio of 1:0.85. The final dough (batter) temperature was $27.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$.

The resulting batter (approximately 450 g per loaf) was poured into non-stick metal loaf pans (internal dimensions $20 \times 10 \times 8$ cm; length \times width \times height) to rest for 15–20 minutes at $20\text{--}22^\circ\text{C}$ (bench rest/pre-fermentation). The main fermentation was carried out for 70–80 minutes (until visible volume increased by approximately 80–90%) in a UNOX Rossela TM proofer (XF193-B, UNOX S.p.A., Italy) at $30\text{--}35^\circ\text{C}$ and 70–85% relative humidity.

Baking was performed in a UNOX Rossela convection oven (model XFT193, UNOX S.p.A., Italy) in two stages: 30 minutes at 175°C followed by 30 minutes at 180°C , without steam injection. The loaves were considered fully baked when the internal crumb temperature reached $96.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$, then the loaves were cooled on the racks to $23\text{--}25^\circ\text{C}$ (approximately 90 minutes) before analytical and sensory measurements.

2.3. Instrumental analysis

Texture (TPA). Crumb texture profile analysis was performed using a TA.HD Plus C texture analyser (Stable Micro Systems, UK). Crumb cubes ($20 \times 20 \times 20$ mm), taken from the central area of three independent loaves (three cubes per loaf), were tested at $23 \pm 1^\circ\text{C}$ ($n=9$). Each sample underwent double compression to 50% deformation using a cylindrical probe P/36R (\varnothing 36 mm), with a test speed of 1 mm/s for all phases (pre-test, test, and post-test). The following parameters were obtained from the force-time curves: hardness, adhesiveness, springiness, gumminess, and chewiness. Cohesiveness was used only as an intermediate factor in these calculations and therefore is not tabulated. Measurements were performed at 6 ± 0.5 h (day 1, after complete cooling) and 24 ± 0.5 h (day 2) after baking. Results are presented as mean \pm standard deviation.

Colour (CIELab). The L^* , a^* , and b^* parameters of the crumb were recorded using a CR-400 colorimeter (Konica Minolta, Japan), with D65 illuminant and 8 mm aperture. The instrument was calibrated before each session using the manufacturer-supplied white calibration plate (BC-10). Two 10-mm crumb slices were taken from each of three independent loaves (3×2), giving $n=6$ colour readings per formulation per time point. The total colour difference between day 1 and day 2 was calculated following the standard ISO 11664-4:2019 [23]:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (1)$$

where ΔL^* , Δa^* , and Δb^* are the differences between the corresponding mean values at the two time points. Perceptibility thresholds adopted for ΔE_{ab}^* were: ≤ 1 imperceptible; 1–3.5 slightly perceptible; 3.5–6 clearly visible; > 6 highly noticeable.

2.4. Sensory analysis

Quantitative Descriptive Analysis (QDA). Descriptive evaluation was conducted in accordance with the standard ISO 13299:2016 [24]. Testing booths, lighting conditions (D65, 1000 lx), and serving procedures complied with ISO 8589:2007 [25]. The panel consisted of 12 trained assessors (6 women, 6 men; aged 20–50), selected based on triangle tests (selection threshold $\geq 80\%$ correct identifications) and repeatability verification (non-significant within-one-assessor variance, $p > 0.05$). Training was carried out in four 90-minute sessions using reference samples to define three texture attributes: bite firmness, springiness, and chewiness. The intensity of each attribute was rated using an 11-point category scale (0 = “very low”, 10 = “very high”) with discrete integer scores and anchored descriptors at 0, 5, 10.

Cubic crumb samples ($20 \times 20 \times 20$ mm) were presented in randomized monadic order, coded with three-digit numbers, at $23 \pm 1^\circ\text{C}$ under D65 lighting (1000 lx). Each sample was evaluated at two time points (6 ± 0.5 h and 24 ± 0.5 h post-baking; day 1 and day 2) to assess early texture evolution (one evaluation per an assessor per formulation per time point; $n=12$ replicates per formulation per time point). Water and unsalted crackers were provided as palate cleansers; a 60–90 s interval was introduced between trying the samples.

Hedonic consumer test. Acceptability was assessed in accordance with ISO 11136:2020 [26,27]. The study involved 100 untrained consumers (38 following a gluten-free diet for ≥ 6 months and 62 without dietary restrictions), aged 20–60 years, recruited voluntarily based on written informed consent, with the possibility to withdraw at any time. Samples (25 g slices, coded with three-digit numbers) were served at $23 \pm 1^\circ\text{C}$ in individual booths. Each participant received five samples per session, presented in a Williams Latin balanced design using an incomplete balanced block plan across two sessions (day 1 and day 2). Appearance, oral texture, taste, and overall acceptability were rated on a 9-point hedonic scale (1 = dislike extremely; 9 = like extremely).

The study was approved by the Ethics Committee of the Technical University of Moldova. The study protocol complied with the Declaration of Helsinki and received ethics clearance as stated in the Institutional Review Board Statement.

2.5. Statistical data analysis

Raw data sets were verified and recorded in Microsoft Excel 365 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA), and then statistically analyzed using GraphPad Prism 10.5 (GraphPad Software LLC, San Diego, CA, USA). For each instrumental and sensory variable, the mean and standard deviation (mean \pm SD) were calculated; the significance level was set at $\alpha=0.05$ (two-tailed criterion). Normality of residuals was checked by Shapiro-Wilk test and homogeneity of variances by Levene's test; where assumptions were not violated, parametric tests were retained. Instrumental texture and colour data were evaluated using two-way ANOVA with factors “Formulation” (9 levels) and “Time” (day 1 vs day 2) plus their interaction. QDA attributes (bite firmness, springiness, chewiness) were analyzed similarly. Hedonic attributes were analyzed by two-way ANOVA. Planned polynomial contrasts (linear, quadratic) were applied to graded purée levels (15–25–35%). Correlations between textural, chromatic, and sensory parameters were estimated using Pearson's correlation coefficient; the resulting matrices were represented as heatmaps (non-significant cells were left uncoloured, $p > 0.05$). Integration of instrumental and sensory variables was performed by Principal Component Analysis (PCA) on standardized data (mean = 0, SD = 1). The first two principal components explained 73% of the total variance on day 1 and 67% on day 2, consistent with the results reported. Loadings with absolute value ≥ 0.60 were considered salient.

Results

3.1. Texture indices

Two-way ANOVA revealed significant main effects of formulation and storage time factors, as well as a significant formulation \times storage time factors interaction, for hardness, adhesiveness, gumminess, and chewiness ($p < 0.0001$ for all). At 6 h post-baking (day 1), crumb hardness ranged from 578.9 ± 3.1 g in the wheat-based reference sample (WB) to $1,487.0 \pm 2.5$ g in the S-GFB+SN (25%) formulation. Among gluten-free (GF) samples, the S-GFB+SO (35%) variant exhibited the lowest hardness (608.9 ± 2.6 g), although it remained significantly higher than WB ($p < 0.05$). Relative to WB, hardness was approximately 144% higher in the sorghum control sample (S-GFB) and 157% higher in S-GFB+SN (25%). Gumminess and chewiness followed the same general pattern as hardness, with the highest values consistently observed for S-GFB+SN (25%), whereas the lowest values were recorded for WB or S-GFB+SO (35%), depending on the additive and storage time (Table 2).

After 24 h of storage (day 2), hardness increased in all samples, with absolute increases ranging from 488.0 g in WB to $1,129.5$ g in S-GFB+SN (25%). The relative ranking of formulations remained unchanged, with S-GFB+SN (25%) remaining the firmest and S-GFB+SO (35%) as the softest GF variant. On the day 2, S-GFB+SO (35%) showed a hardness of $1,098.1 \pm 3.6$ g, corresponding to approximately 56% lower hardness than the sorghum control sample. Gumminess and chewiness also increased after storage and largely mirrored the hardness pattern across formulations, being consistent with progressive crumb firming during post-baking storage.

3.2. Color parameters

Two-way ANOVA revealed significant main effects of formulation and storage time, as well as a significant formulation \times storage time interaction, for crumb L^* , a^* , and b^* coordinates ($p < 0.0001$ for all effects, except

Table 2. Instrumental Texture Profile Analysis (TPA) of control and gluten-free breads fortified with *S. nigra* or *S. oleracea* purée (hardness, adhesiveness, gumminess, chewiness at 6 h (Day 1) and 24 h (Day 2) post-baking)

Таблица 2. Инструментальный анализ профиля консистенции (TPA) контрольного образца хлеба и безглютенового хлеба, обогащенного пюре из *S. nigra* или *S. oleracea* (черствость, липкость, клейкость, разжевываемость через 6 часов (день 1) и 24 часа (день 2) после выпечки)

Sample	Hardness (g) Day 1	Hardness (g) Day 2	Adhesiveness (g-s) Day 1	Adhesiveness (g-s) Day 2	Gumminess (g) Day 1	Gumminess (g) Day 2	Chewiness (g) Day 1	Chewiness (g) Day 2
WB	578.9±3.1 ^a	1066.9±4.1 ^a	-507.6±4.0 ^a	-1143.0±5.0 ^b	303.3±2.8 ^a	643.3±4.7 ^b	345.9±3.0 ^b	600.6±5.0 ^b
S-GFB	1410.9±2.1 ^h	2480.0±5.0 ^h	-1089.0±3.0 ^h	-2751.1±5.4 ⁱ	559.4±4.6 ^e	961.6±5.9 ^g	724.8±4.8 ^g	867.0±5.3 ^f
S-GFB+CS	797.6±4.9 ^f	1435.7±4.3 ^f	-724.8±3.9 ^e	-1292.0±4.6 ^f	427.5±4.1 ^c	832.7±4.5 ^f	470.4±3.8 ^e	832.7±4.5 ^e
S-GFB+SN15	741.1±4.5 ^d	1339.0±4.1 ^d	-735.5±3.6 ^f	-1205.0±4.8 ^d	422.7±3.3 ^c	776.6±4.3 ^d	425.9±2.9 ^c	776.6±4.3 ^c
S-GFB+SN25	1487.0±2.5 ⁱ	2616.5±2.5 ⁱ	-1338.0±3.4 ⁱ	-2643.0±3.1 ^h	862.5±4.2 ^g	1918.0±3.6 ⁱ	862.5±4.2 ^h	1766.0±3.8 ^h
S-GFB+SN35	730.0±2.5 ^c	1281.5±2.5 ^c	-657.0±4.1 ^c	-1067.2±3.9 ^a	423.4±4.0 ^c	717.6±4.1 ^c	423.4±4.0 ^c	597.4±3.9 ^b
S-GFB+SO15	984.0±2.2 ^g	1771.0±3.1 ^g	-885.6±4.0 ^g	-1594.0±4.4 ^g	570.7±4.3 ^f	1027.0±4.6 ^h	570.7±4.3 ^f	1027.0±4.6 ^g
S-GFB+SO25	774.0±2.6 ^e	1393.0±2.9 ^e	-696.6±4.2 ^d	-1254.3±4.2 ^e	448.9±4.0 ^d	807.9±4.1 ^e	448.9±4.0 ^d	807.9±4.1 ^d
S-GFB+SO35	608.9±2.6 ^b	1098.1±3.6 ^b	-537.5±4.1 ^b	-1161.2±4.8 ^c	378.3±3.7 ^b	539.1±4.4 ^a	333.9±3.5 ^a	570.0±4.4 ^a

Legend: WB=wheat-based bread (reference sample); S-GFB=sorghum-based gluten-free bread; CS=corn starch; SN=*S. nigra* purée; SO=*S. oleracea* purée; 15, 25, 35=purée inclusion level (% flour basis).

Note: Values are mean±SD (n=9; 3 loaves×3 central crumb cubes). For each textural parameter, means within the same column bearing different superscript letters differ significantly among formulations at p<0.05 according to Tukey's multiple-comparisons test following two-way ANOVA. Negative adhesiveness values denote detachment work.

storage time for *b*^{*}, p=0.0004). At 6 h post-baking (day 1), crumb lightness (*L*^{*}) ranged from 53.87±0.13 for S-GFB+SN (25%) to 78.00±0.14 for S-GFB+CS, compared with 64.96±0.14 for WB and 75.32±0.33 for S-GFB (Table 3).

The addition of elderberry purée decreased *L*^{*} values and shifted *a*^{*} coordinates toward positive values (red-violet hues), whereas spinach purée increased *b*^{*} values (yellow tones) and shifted *a*^{*} toward more negative values (greenish hues). On the day 1, all formulations differed significantly in *L*^{*}. For *a*^{*}, S-GFB and S-GFB+CS were statistically comparable, whereas for *b*^{*}, S-GFB+SN (25%) and S-GFB+SN (35%) did not differ significantly.

After 24 h of storage (day 2), formulation-dependent changes were observed in crumb colour coordinates and total color difference. WB showed the highest increase in lightness ($\Delta L^* = 8.07 \pm 0.26$) and the largest total color difference ($\Delta Eab = 8.32 \pm 0.10$), indicating a highly noticeable crumb color change during storage. In contrast, S-GFB presented a slight decrease in lightness ($\Delta L^* = -1.50 \pm 0.22$) and a much smaller total colour difference ($\Delta Eab = 2.22 \pm 0.18$). Among elderberry-enriched bread variants, the largest variation occurred in S-GFB+SN (25%) ($\Delta L^* = 6.13 \pm 0.28$; $\Delta Eab = 6.45 \pm 0.17$), whereas S-GFB+SN (35%) showed the greatest colour stability ($\Delta Eab = 0.50 \pm 0.33$). Spinach-enriched bread formulations showed lower total colour differences, with ΔEab values ranging from 1.22 to 3.17, corresponding to slightly perceptible changes. On the day 2, all formulations continued to differ significantly in *L*. For *a*^{*}, WB and S-GFB+CS were statistically comparable, whereas for *b*^{*}, S-GFB+SN (25%) and S-GFB+SN (35%) again did not differ significantly. Overall, storage induced formulation-dependent changes in crumb colour. Compared with WB and S-GFB+SN (25%), spinach-containing breads generally exhibited lower total colour differences during storage, although the highest colour stability was observed for S-GFB+SN (35%).

Table 3. CIELAB crumb color parameters at 6 h (Day 1) and 24 h (Day 2) and total color difference (ΔE^*ab) in control and gluten-free breads fortified with *S. nigra* or *S. oleracea* purée

Таблица 3. Параметры цвета хлебного мякиша по шкале цвета CIELAB через 6 часов (день 1) и 24 часа (день 2), а также общая разница в цвете (ΔE^*ab) в контрольном образце хлеба и безглютеновом хлебе, обогащенном пюре из *S. nigra* или *S. oleracea*

Sample	<i>L</i> [*] D1	<i>a</i> [*] D1	<i>b</i> [*] D1	<i>L</i> [*] D2	<i>a</i> [*] D2	<i>b</i> [*] D2	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*ab
WB	64.96±0.14 ^e	-1.71±0.48 ^d	17.88±0.37 ^f	73.03±0.35 ^f	-1.77±0.21 ^d	19.90±0.32 ^f	8.07±0.26	-0.06±0.18	2.02±0.23	8.32±0.10
S-GFB	75.32±0.33 ^h	-0.80±0.44 ^e	15.68±0.39 ^e	73.82±0.31 ^g	-0.73±0.34 ^e	17.31±0.45 ^e	-1.50±0.22	0.07±0.31	1.63±0.16	2.22±0.18
S-GFB+CS	78.00±0.14 ⁱ	-1.00±0.30 ^e	14.00±0.49 ^d	76.21±0.38 ^h	-2.02±0.17 ^d	15.09±0.19 ^d	-1.79±0.48	-1.02±0.12	1.09±0.34	2.33±0.38
S-GFB+SN15	45.00±0.40 ^c	11.00±0.48 ^f	7.00±0.18 ^c	47.80±0.20 ^c	11.31±0.32 ^f	7.69±0.48 ^c	2.80±0.47	0.31±0.36	0.69±0.22	2.90±0.21
S-GFB+SN25	33.87±0.13 ^a	14.81±0.16 ^h	5.14±0.42 ^a	40.00±0.26 ^b	13.00±0.22 ^g	6.00±0.26 ^a	6.13±0.28	-1.81±0.16	0.86±0.18	6.45±0.17
S-GFB+SN35	37.51±0.16 ^b	13.90±0.43 ^g	5.47±0.42 ^a	38.00±0.10 ^a	14.00±0.21 ^h	5.50±0.25 ^a	0.49±0.15	0.10±0.15	0.03±0.26	0.50±0.33
S-GFB+SO15	70.00±0.18 ^g	-3.00±0.19 ^c	25.00±0.21 ^g	71.00±0.27 ^e	-2.80±0.33 ^c	22.00±0.26 ^g	1.00±0.41	0.20±0.42	-3.00±0.29	3.17±0.19
S-GFB+SO25	68.00±0.32 ^f	-4.50±0.10 ^b	28.00±0.41 ^h	69.00±0.49 ^d	-4.80±0.23 ^b	27.00±0.40 ^h	1.00±0.44	-0.30±0.11	-1.00±0.15	1.45±0.12
S-GFB+SO35	66.57±0.40 ^d	-6.07±0.19 ^a	31.56±0.20 ⁱ	67.74±0.14 ^c	-6.42±0.49 ^a	31.53±0.44 ⁱ	1.17±0.33	-0.35±0.36	-0.03±0.35	1.22±0.39

Legend: WB=wheat-based bread (reference sample); S-GFB=sorghum-based gluten-free bread; S-GFB+CS=sorghum GF bread with added corn starch; SN15/SN25/SN35=S-GFB with 15/25/35% *S. nigra* purée; SO15/SO25/SO35=S-GFB with 15/25/35% *S. oleracea* purée (percentages on flour basis).

Note: Values are mean±SD (n=6 colour readings per formulation per time point; 3 loaves×2 slices). For *L*^{*}, *a*^{*}, and *b*^{*} coordinates, means within the same column bearing different superscript letters differ significantly among formulations at p<0.05 according to Tukey's multiple-comparisons test following two-way ANOVA. ΔL^* , Δa^* , Δb^* , and ΔE^*ab denote day 2 – day 1 differences. Perceptibility thresholds (ΔE^*ab): <1 imperceptible; 1–3.5 slightly perceptible; 3.5–6 clearly visible; >6 highly noticeable.

Table 4. Quantitative Descriptive Analysis (QDA) texture attributes for the bread samples

Таблица 4. Количественный описательный анализ (КОА) параметров консистенции образцов хлеба

Sample	Bite firmness Day 1	Bite firmness Day 2	Springiness Day 1	Springiness Day 2	Chewiness Day 1	Chewiness Day 2
WB	4.50±0.30 ^{de}	6.80±0.60 ^b	5.60±0.55 ^{ab}	4.90±0.40 ^{bc}	5.00±0.50 ^{ab}	7.10±0.70 ^{ab}
S-GFB	5.40±0.45 ^{bc}	7.30±0.65 ^a	5.80±0.50 ^{ac}	5.10±0.45 ^b	5.40±0.55 ^{abc}	7.90±0.65 ^{bc}
S-GFB+CS	4.70±0.55 ^{cde}	6.40±0.55 ^c	5.70±0.45 ^{ab}	5.80±0.55 ^a	5.10±0.70 ^{ab}	7.30±0.60 ^{ab}
S-GFB+SN 15%	4.80±0.40 ^{cd}	6.20±0.50 ^{cd}	5.90±0.50 ^a	4.70±0.45 ^{bc}	5.60±0.65 ^{bc}	7.80±0.60 ^{bc}
S-GFB+SN 25%	5.20±0.50 ^{bc}	7.40±0.65 ^a	5.90±0.55 ^a	4.70±0.65 ^{bc}	5.70±0.55 ^c	7.90±0.60 ^{bc}
S-GFB+SN 35%	4.30±0.45 ^e	5.90±0.55 ^d	5.50±0.60 ^{ab}	4.80±0.45 ^{bc}	6.10±0.65 ^d	6.90±0.60 ^a
S-GFB+SO 15%	4.30±0.50 ^e	6.00±0.60 ^d	5.30±0.45 ^b	4.90±0.45 ^{bc}	5.40±0.55 ^{abc}	7.40±0.55 ^{ab}
S-GFB+SO 25%	4.50±0.55 ^{de}	6.10±0.55 ^{cd}	5.70±0.50 ^{ab}	5.10±0.50 ^{bc}	5.00±0.60 ^a	7.00±0.65 ^a
S-GFB+SO 35%	5.80±0.50 ^a	7.60±0.70 ^a	5.40±0.55 ^{bc}	4.60±0.50 ^c	5.60±0.60 ^{bc}	8.20±0.65 ^c

Legend: WB = wheat-based bread (reference sample); S-GFB = sorghum-based gluten-free bread; CS = corn starch; SN = *S. nigra* purée; SO = *S. oleracea* purée; numerals (15, 25, 35) = % purée (flour basis).

Note: Values are mean ± SD ($n = 12$; one evaluation per assessor per formulation per time point). Within each column and for each sensory attribute, means bearing different superscript letters differ significantly among formulations at $p < 0.05$ according to Tukey's multiple-comparisons test following two-way ANOVA.

3.4. Hedonic test – overall acceptability

Two-way ANOVA revealed significant effects of formulation, storage time, and formulation × time factors interaction on overall hedonic acceptability ($p = 0.0007$ for interaction; $p < 0.0001$ for formulation and time). On the day 1, all gluten-free breads achieved mean scores ≥ 7.0 , comparable to or slightly higher than the wheat control (WB: 6.70 ± 0.70). The highest scores were observed in S-GFB+SN (15%) (7.40 ± 0.70) and S-GFB+SN (35%) (7.50 ± 0.72), whereas WB remained among the lowest-rated samples. Although numerical differences among formulations did not exceed 0.80 points, Tukey's test indicated significant differences between selected pairs of the samples (Table 5).

Table 5. Overall hedonic acceptability of the bread samples (9-point scale: 1 = dislike extremely; 9 = like extremely). Values are mean ± SD ($n = 100$ consumer)

Таблица 5. Общая гедонистическая приемлемость образцов хлеба (по 9-балльной шкале, где: 1 = крайне не нравится; 9 = крайне нравится). Значения представлены как среднее ± стандартное отклонение ($n = 100$ потребителей)

Sample	Day 1	Day 2
WB	6.70±0.70 ^{ab}	5.90±0.80 ^a
S-GFB	7.00±0.75 ^{abc}	6.20±0.85 ^{ab}
S-GFB+CS	7.10±0.78 ^{bc}	6.10±0.88 ^{ab}
S-GFB+SN 15%	7.40±0.70 ^c	6.00±0.90 ^{ab}
S-GFB+SN 25%	7.20±0.74 ^{bc}	6.20±0.88 ^{ab}
S-GFB+SN 35%	7.50±0.72 ^c	6.80±0.85 ^c
S-GFB+SO 15%	7.20±0.76 ^{bc}	6.40±0.88 ^b
S-GFB+SO 25%	7.30±0.75 ^{bc}	6.50±0.90 ^{bc}
S-GFB+SO 35%	7.10±0.79 ^{bc}	6.30±0.92 ^b

Legend: WB = wheat-based bread (reference sample); S-GFB = sorghum-based gluten-free bread; CS = corn starch; SN = *S. nigra* purée; SO = *S. oleracea* purée; numerals (15, 25, 35) = % purée (flour basis).

Note: Values are mean ± SD ($n = 100$ individual ratings per sample per day). Within each column, means bearing different superscript letters differ significantly among formulations at $p < 0.05$ according to Tukey's multiple-comparisons test following two-way ANOVA. Hedonic scores were recorded on a 9-point scale (1 = dislike extremely; 9 = like extremely).

On the day 2, overall acceptability decreased in all samples by 0.70 to 1.40 points. The smallest reduction was recorded for S-GFB+SN (35%) (final score 6.80 ± 0.85), which remained the highest-rated variant, whereas WB showed the lowest value (5.90 ± 0.80). Despite this decline, all gluten-free formulations retained scores at or above 6.0, remaining within the acceptable hedonic range.

3.5. Correlation between instrumental parameters and sensory perception

Day 1. Pearson correlation coefficients (formulation means, $n = 9$) indicated a compact instrumental texture cluster: hardness, gumminess, and instrumental chewiness were strongly inter-correlated ($r = 0.90 - 0.99$, $p \leq 0.001$), while adhesiveness correlated inversely with these parameters ($r = -0.96$ to -0.99 , $p < 0.001$). Bite firmness (QDA) showed a weak, non-significant association with hardness ($r = 0.31$, $p > 0.05$). Overall acceptability showed a non-significant trend with chewiness (QDA) ($r = 0.63$, $p = 0.07$) and no association with springiness ($r = 0.06$, $p > 0.05$). Only the high inter-correlations within instrumental parameters and their inverse relation with adhesiveness were statistically robust (Figure 1).

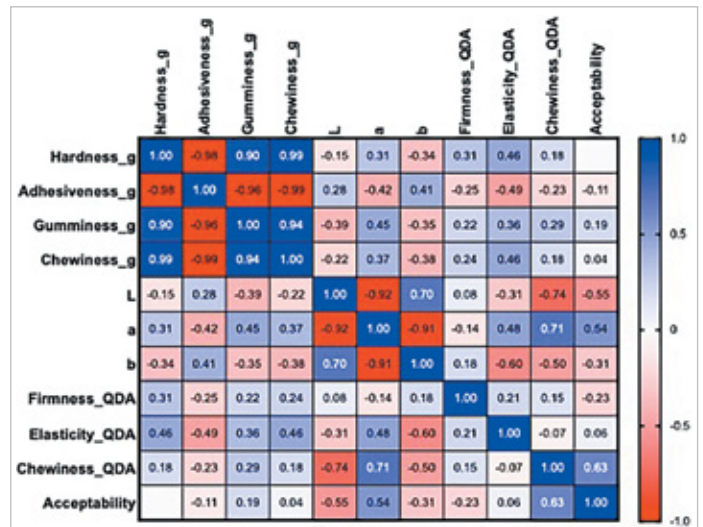


Figure 1. Pearson correlation matrix of instrumental texture, crumb colour, sensory texture attributes, and overall acceptability of bread samples on the day 1

Legend: Pearson correlation matrix of instrumental texture parameters (hardness, adhesiveness, gumminess, instrumental chewiness), crumb colour coordinates (L^* , a^* , b^*), sensory texture attributes [bite firmness, springiness, and chewiness assessed by Quantitative Descriptive Analysis (QDA)], and overall hedonic acceptability of bread samples on the day 1. Cell values represent Pearson correlation coefficients (r) calculated using formulation means ($n = 9$). Blue indicates positive correlations and red indicates negative correlations; color intensity is proportional to the absolute value of the correlation coefficient ($|r|$). White cells denote non-significant correlations ($p > 0.05$)

Рисунок 1. Матрица корреляций Пирсона инструментально измеренных характеристик консистенции, цвета мякитиша, органолептических характеристик консистенции хлеба и общей приемлемости образцов хлеба в 1-й день

Day 2. After 24 h, the instrumental texture cluster persisted, with gumminess and instrumental chewiness remaining extremely inter-correlated ($r = 0.99$), while hardness retained a strong but attenuated association with gumminess and instrumental chewiness ($r = 0.81 - 0.84$). Adhesiveness continued to correlate inversely very strongly with hardness ($r = -0.98$), though its inverse links to gumminess and instrumental chewiness weakened ($r = -0.73$ to -0.76). Bite firmness (QDA) showed only a weak, non-significant correlation with hardness ($r = 0.39$), indicating that storage did not increase alignment between perceived and instrumental firmness. Overall acceptability showed weak, non-significant negative associations with bite firmness and chewiness (QDA) ($r = -0.41$ to -0.43). This pattern may indicate a tendency toward better acceptance of formulations retaining lower perceived firmness and chewiness after 24 h, but the associations were not statistically significant. Correlations with colour coordinates remained weak or absent (Figure 2).

PCA. On Day 1, PC1 (48%) represented a firmness-adhesiveness axis (positive loadings ≥ 0.60 for hardness, gumminess, instrumental chewiness, bite firmness (QDA); strong negative for adhesiveness), while PC2 (25%) was mainly associated with variation in a^* , overall acceptability, and springiness (QDA) (Figure 3a).

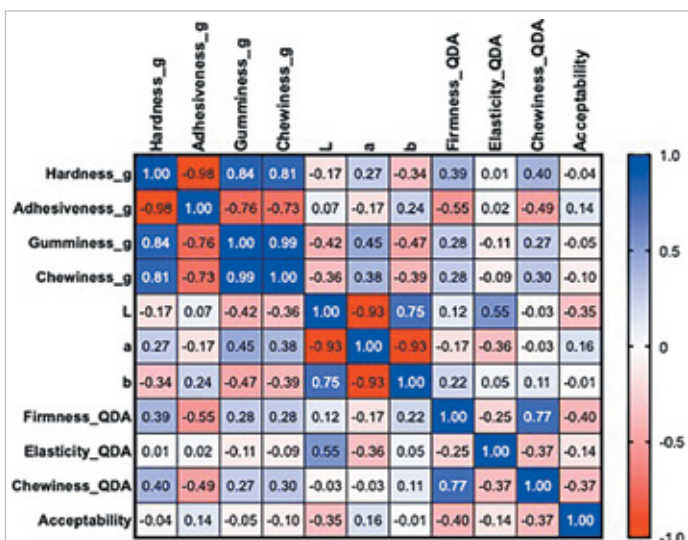


Figure 2. Pearson correlation matrix of instrumental texture, crumb colour, sensory texture attributes, and overall acceptability of bread samples on the day 2

Legend: Pearson correlation matrix of instrumental texture parameters (hardness, adhesiveness, gumminess, instrumental chewiness), crumb colour coordinates (L^* , a^* , b^*), sensory texture attributes [bite firmness, springiness, and chewiness assessed by Quantitative Descriptive Analysis (QDA)], and overall hedonic acceptability of bread samples on the day 2. Cell values represent Pearson correlation coefficients (r) calculated using formulation means ($n=9$). Blue indicates positive correlations and red indicates negative correlations; color intensity is proportional to the absolute value of the correlation coefficient ($|r|$). White cells denote non-significant correlations ($p>0.05$).

Рисунок 2. Матрица корреляций Пирсона инструментально измеренных характеристик консистенции, цвета мякиша, органолептических характеристик консистенции хлеба и общей приемлемости образцов хлеба во 2-й день

On the day 2, the first two components explained 67% of variance (PC1=41%, PC2=26%). PC1 remained dominated by the instrumental axis (gumminess and instrumental chewiness highest; hardness moderate; adhesiveness negative), with bite firmness (QDA) loading modestly, indicating limited convergence of instrumental and perceived firmness after storage. PC2 captured residual sensory-color variation; overall acceptability was positioned away from the high-chewiness/high-firmness region, in line with its weak negative associations with sensory firmness and chewiness (Figure 3b).

4. Discussions

This study shows that the partial replacement of the solid phase in sorghum-based gluten-free bread with fresh integral *S. nigra* and *S. oleracea* purées enables the simultaneous achievement of clear chromatic differentiation and the maintenance of consumer acceptability after 24 h in the gluten-free bread formulations. The principal contribution lies in demonstrating that minimally processed, unpasteurised plant purées can act as multifunctional clean-label ingredients while modulating instrumental texture in a formulation-dependent manner [11,28].

4.1. Texture and color: Integrated interpretation

The strong clustering of instrumental parameters (hardness, gumminess, chewiness) and their inverse correlation with adhesiveness confirms the mechanical interdependence already reported in other hydrocolloid-rich gluten-free matrices [3]. The inclusion of purées did not disrupt this structure; rather, it modulated the magnitude of textural responses in a formulation-dependent manner, with several purée-containing breads showing reduced firmness relative to the entirely sorghum control sample. This attenuation is consistent with mechanisms previously reported for vegetable or fibre ingredients, namely water retention mediated by dietary fibre and partial dilution of the starch-protein fraction [7,29].

From a chromatic perspective, *S. nigra* shifted the crumb towards positive a^* coordinates (red-violet hues), while *S. oleracea* induced shifts towards more negative a^* and higher b^* values (green-yellow tones), thus generating two distinct visual identities without deterioration of hedonic scores [7,29]. The relatively low ΔE^* values observed in spinach variants suggest greater short-term pigment stability, whereas the marked increase in lightness observed in the WB control and in S-GFB+SN (25%) indicates more pronounced colour evolution during storage. Such changes likely reflect moisture redistribution and starch realignment processes,

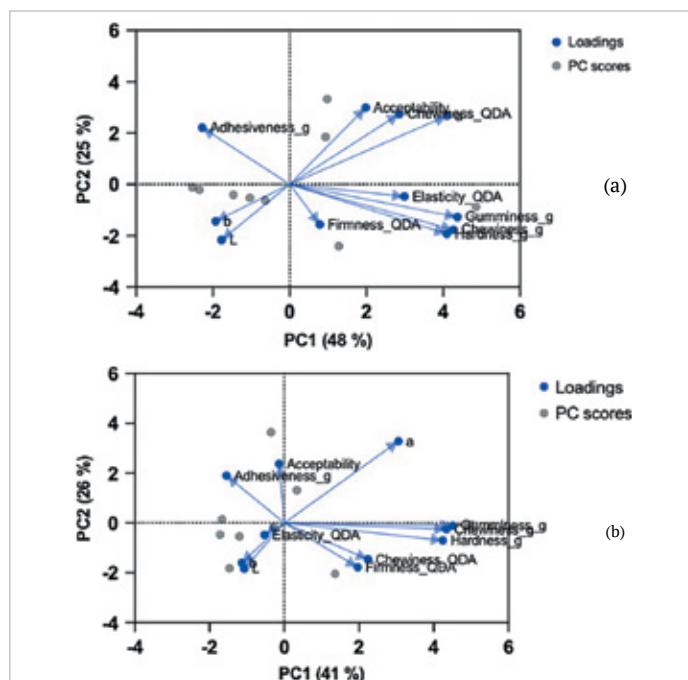


Figure 3. PCA biplots of instrumental, sensory, colour, and hedonic variables

Legend: (a) Day 1; (b) Day 2. Arrows indicate variable loadings and points indicate the scores of the nine bread formulations. Variables included instrumental texture parameters, sensory QDA attributes, crumb colour coordinates (L^* , a^* , b^*), and overall hedonic acceptability. Variance explained by PC1/PC2 was 48%/25% for the day 1 and 41%/26% for the day 2.

Рисунок 3. Двойные диаграммы переменных инструментальных, органолептических, цветовых и hedонических значений анализа основного компонента (PCA)

which phenomena are described in early staling studies of gluten-free and composite breads [7,30]

4.2. Correlation with sensory perception and acceptability

The weak correspondence between perceived bite firmness and instrumental resistance parameters indicates that oral perception of structure is influenced by additional factors not fully captured by TPA, such as pore distribution, local moisture, bolus formation, and hydrocolloid-water interactions. This pattern is consistent with previous findings in gluten-free breads [31].

Overall acceptability scores remained high on the day 1 and decreased moderately after 24 h, a trend consistent with early staling mechanisms involving moisture redistribution and starch retrogradation. Despite the increase in instrumental firmness during storage, consumer ratings for all gluten-free formulations remained at or above the acceptance threshold, suggesting that these early texture changes were not sufficient to impair liking within the evaluated time frame. Among the formulations, the 35% elderberry-enriched bread variant combined pronounced visual differentiation with the highest hedonic score after 24 h, indicating good short-term consumer liking retention. In contrast, spinach purée-enriched bread contributed to colour diversification with only limited reductions in acceptability, suggesting that consumers tolerated natural chromatic shifts as long as overall sensory quality remained within an acceptable range [21,32].

4.3. Limitations and future directions

This study has several limitations. First, the temporal window was restricted to 24 h, which does not cover the full staling kinetics of gluten-free bread [30]. Second, the correlation analysis was based on a limited number of formulation means ($n=9$), thus reducing statistical power and requiring cautious interpretation of moderate coefficients [33]. Third, no rheological or microstructural data (e.g., dynamic oscillatory tests, imaging) were collected, and no water-state analyses (DSC or low-field NMR) were performed, so the proposed mechanisms remain inferential only [34,35]. Fourth, the use of unpasteurised purées did not allow assessment of microbiological stability or long-term pigment retention [36,37]. Finally, post-baking nutritional parameters, such as dietary fibre content and residual anthocyanins or carotenoids, were not measured [38].

Future studies should extend the observation period beyond 24 h, ideally to 48–72 h, to track firmness and color dynamics trajectories together with starch retrogradation kinetics [30,39]. Additional analyses should include rheology and quantitative imaging (X-ray micro-CT, SEM,

digital image analysis) to better relate crumb microstructure to textural evolution [34,35], as well as DSC and low-field NMR to assess water redistribution. Chromatographic monitoring (HPLC-DAD, LC-MS) of anthocyanins, chlorophylls, and carotenoids would further clarify pigment stability [36,38]. Moreover, validation using a dedicated celiac consumer panel, alongside a general consumer cohort, would strengthen the translational relevance of the sensory findings [31,40].

5. Conclusion

Fresh whole *S. nigra* and *S. oleracea* purées added to the recipes demonstrated potential as multifunctional clean-label ingredients in sorghum-based gluten-free bread. Their inclusion provided clear bidi-

rectional chromatic differentiation (red-violet vs. green-yellow) while maintaining consumer acceptability within 24 h after the breads baking. The bread with added 35 % of elderberry puree achieved the most favourable balance between distinctive color and hedonic retention, whereas spinach-containing bread formulations contributed to visual diversification without compromising consumer liking.

The partial decoupling observed between instrumental TPA metrics and perceived bite firmness highlights the need for future studies with inclusion of microstructural and rheological analyses. Overall, these findings support the potential use of fresh, unpasteurised plant purées as a dual strategy for natural color enrichment and short-term textural modulation in gluten-free bread.

REFERENCES

1. Fact.MR. (2025). Gluten-free Bread Market (2025–2035): Gluten-free Bread Market Size and Share Forecast Outlook 2025 to 2035 (Food and Beverage No. FACT647MR; p. 170). Fact.MR. Retrieved from <https://www.factmr.com/report/647/gluten-free-bread-market/> Accessed June 17, 2025.
2. Siminiuc, R., Turcanu, D. (2023). Technological approaches applied in the design of gluten-free bakery products. *Czech Journal of Food Sciences*, 41(3), 155–172. <https://doi.org/10.17221/180/2022-CJFS>
3. Cappelli, A., Oliva, N., Cini, E. (2020). A systematic review of gluten-free dough and bread: Dough rheology, bread characteristics, and improvement strategies. *Applied Sciences*, 10(18), Article 6559. <https://doi.org/10.3390/app10186559>
4. Celiac Disease Statistics. (2022). Celiac Disease and Gluten – Free statistic and facts. Retrieved from <https://www.goglutenfreely.com/ceeliac-disease-and-gluten-free-statistics/> Accessed June 17, 2025.
5. Peñalver, R., Ros, G., Nieto, G. (2023). Development of gluten-free functional bread adapted to the nutritional requirements of celiac patients. *Fermentation*, 9(7), Article 631. <https://doi.org/10.3390/fermentation9070631>
6. Siminiuc, R., Turcanu, D. (2022). Food security of people with celiac disease in the Republic of Moldova through prism of public policies. *Frontiers in Public Health*, 10, Article 961827. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.961827>
7. Fratelli, C., Santos, F. G., Muniz, D. G., Habu, S., Braga, A. R. C., Capriles, V. D. (2021). Psyllium improves the quality and shelf life of gluten-free bread. *Foods*, 10(5), Article 954. <https://doi.org/10.3390/foods10050954>
8. Liu, X., Mu, T., Sun, H., Zhang, M., Chen, J., Fauconnier, M. L. (2019). Effect of ingredients on the quality of gluten-free steamed bread based on potato flour. *Journal of Food Science and Technology*, 56(6), 2865–2875. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03730-9>
9. Torres-Pérez, R., Martínez-García, E., Siguero-Tudela, M. M., García-Segovia, P., Martínez-Monzo, J., Igual, M. (2024). Enhancing gluten-free bread production: impact of hydroxypropyl methylcellulose, psyllium husk fiber, and xanthan gum on dough characteristics and bread quality. *Foods*, 13(11), Article 1691. <https://doi.org/10.3390/foods13111691>
10. Zhang, J., Zhu, Q., Cheng, L., Kang, J., Liu, H., Zhang, L. et al. (2025). Enhancing gluten-free dough and bread properties using xanthan gum and its trifluoroacetic acid hydrolytes. *Food Hydrocolloids*, 164, Article 111204. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111204>
11. Kajzer, M., Diowksz, A. (2021). The clean label concept: Novel approaches in gluten-free breadmaking. *Applied Sciences*, 11(13), Article 6129. <https://doi.org/10.3390/app11136129>
12. Quinte, L., Valderrama, I., Best, I. (2025). Evaluation of the effect of improvers: Psyllium and xanthan gum in bread loaf with partial replacement of quinoa flour. *Foods*, 14(3), Article 418. <https://doi.org/10.3390/foods14030418>
13. Saeed Omer, S. H., Hong, J., Zheng, X., Khashaba, R. (2023). Sorghum flour and sorghum flour enriched bread: Characterizations, challenges, and potential improvements. *Foods*, 12(23), Article 4221. <https://doi.org/10.3390/foods12234221>
14. Rumler, R., Bender, D., Marti, A., Biber, S., Schoenlechner, R. (2024). Investigating the impact of sorghum variety and type of flour on chemical, functional, rheological and baking properties. *Journal of Cereal Science*, 116, Article 103881. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103881>
15. Siminiuc, R., Coşciug, L., Popescu, L., Bulgaru, V. (2012). The effect of dehulling and thermal treatment on the protein fractions in sorghum (*Sorghum oryzoidum*) grains. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI-Food Technology*, 36(1), 97–103.
16. dos Reis Gallo, L. R., Reis, C. E. G., Mendonça, M. A., da Silva, V. S. N., Pacheco, M. T. B., Botelho, R. B. A. (2021). Impact of gluten-free sorghum bread genotypes on glycemic and antioxidant responses in healthy adults. *Foods*, 10(10), Article 2256. <https://doi.org/10.3390/foods10102256>
17. Roşca, I., Palancean, A., Onica, E. (2019). Particularităţile creşterii, dezvoltării şi cultivării plantelor de *Sambucus Nigra* L. în Republica Moldova. *Journal of Botany*, XI(1(18)), 76–82. [Roşca, I., Palancean, A., Onica, E. (2019). Peculiarities of growth, development and cultivation of *Sambucus Nigra* L. in the Republic of Moldova. *Journal of Botany*, XI(1(18)), 76–82. (In Romanian)]
18. Seymenska, D., Teneva, D., Nikolova, I., Benbassat, N., Denev, P. (2024). In vivo anti-inflammatory and antinociceptive activities of black elder (*Sambucus nigra* L.) Fruit and Flower Extracts. *Pharmaceuticals*, 17(4), Article 409. <https://doi.org/10.3390/ph17040409>
19. Seixas, N. L., Paula, V. B., Dias, T., Dias, L. G., Estevinho, L. M. (2025). The effect of incorporating fermented elderberries (*Sambucus nigra*) into bread: Quality, shelf life, and biological enhancement. *Foods*, 14(5), Article 724. <https://doi.org/10.3390/foods14050724>
20. Derrien, M., Badr, A., Gosselin, A., Desjardins, Y., Angers, P. (2017). Optimization of a green process for the extraction of lutein and chlorophyll from spinach by-products using response surface methodology (RSM). *LWT – Food Science and Technology*, 79, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.010>
21. Prasad, R. V., Dhital, S., Williamson, G., Barber, E. (2024). Nutrient composition, physical characteristics and sensory quality of spinach-enriched wheat bread. *Foods*, 13(15), Article 2401. <https://doi.org/10.3390/foods13152401>
22. Onyango, C., Mutungi, C., Unbehend, G., Lindhauer, M. G. (2011). Modification of gluten-free sorghum batter and bread using maize, potato, cassava or rice starch. *LWT – Food Science and Technology*, 44(5), 681–686. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.09.006>
23. International Organization for Standardization. (2019). Colorimetry-Part 4: CIE 1976 $L^*a^*b^*$ colour space (ISO/CIE 11664–4:2019; 1st edn). International Organization for Standardization. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/74166.html> Accessed June 17, 2025.
24. International Organization for Standardization. (2016). Sensory analysis – Methodology – General guidance for establishing a sensory profile (ISO 13299:2016; 2nd edn). International Organization for Standardization. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13299:ed-2:v1:en> Accessed June 17, 2025.
25. International Organization for Standardization. (2007). Sensory analysis – General guidance for the design of test rooms (ISO 8589:2007; 2nd edn). International Organization for Standardization. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/36385.html> Accessed June 17, 2025.
26. International Organization for Standardization. (2020). Sensory analysis – Methodology – General guidance for conducting hedonic tests with consumers in a controlled area. Amendment 1 (ISO 11136:2014/Amd 1:2020; 1st edn). International Organization for Standardization. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/75557.html> Accessed June 17, 2025.
27. International Organization for Standardization. (2014). Sensory analysis – Methodology – General guidance for conducting hedonic tests with consumers in a controlled area (ISO 11136:2014; 1st edn). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/50125.html> Accessed June 17, 2025.
28. Šmídová, Z., Rysová, J. (2022). Gluten-free bread and bakery products technology. *Foods*, 11(3), Article 480. <https://doi.org/10.3390/foods11030480>
29. Culetu, A., Susman, I. E., Duta, D. E., Belc, N. (2021). Nutritional and functional properties of gluten-free flours. *Applied Sciences*, 11(14), Article 6283. <https://doi.org/10.3390/app11146283>
30. Gray, J. A., Bemiller, J. N. (2003). Bread staling: Molecular basis and control. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2(1), 1–21. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2003.tb00011.x>
31. Tóth, M., Kaszab, T., Meretei, A. (2022). Texture profile analysis and sensory evaluation of commercially available gluten-free bread samples. *European Food Research and Technology*, 248(6), 1447–1455. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03944-2>
32. Domínguez, R., Pateiro, M., Munekata, P. E. S., Santos López, E. M., Rodríguez, J. A., Barros, L. et al. (2021). Potential use of elderberry (*Sambucus nigra* L.) as natural colorant and antioxidant in the food industry. A review. *Foods*, 10(11), Article 2713. <https://doi.org/10.3390/foods10112713>
33. Matos, M. E., Rosell, C. M. (2012). Relationship between instrumental parameters and sensory characteristics in gluten-free breads. *European Food Research and Technology*, 235(1), 107–117. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1736-5>
34. Choi, Y. J. (2010). Analytical methodology for bread staling. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 53(4), 389–400. <https://doi.org/10.3839/jksabc.2010.061>
35. Matos, M. E., Rosell, C. M. (2015). Understanding gluten-free dough for reaching breads with physical quality and nutritional balance: Understanding gluten-free dough. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(4), 653–661. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6732>
36. Patras, A., Brunton, Nigel, P., O'Donnell, C., Tiwari, B. K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods: Mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science and Technology*, 21(1), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.004>
37. Ghendov-Mosanu, A., Cristea, E., Patras, A., Sturza, R., Nicolau, M. (2020). Rose Hips, a valuable source of antioxidants to improve gingerbread characteristics. *Molecules*, 25(23), Article 5659. <https://doi.org/10.3390/molecules25235659>
38. Miglio, C., Chiavaro, E., Visconti, A., Fogliano, V., Pellegrini, N. (2008). Effects of different cooking methods on nutritional and physicochemical characteristics of selected vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(1), 139–147. <https://doi.org/10.1021/jf072304b>
39. Fadda, C., Sanguinetti, A. M., Del Caro, A., Collar, C., Piga, A. (2014). Bread staling: Updating the view. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(4), 473–492. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12064>
40. Pagliarini, E., Laureati, M., Lavelli, V. (2010). Sensory evaluation of gluten-free breads assessed by a trained panel of celiac assessors. *European Food Research and Technology*, 231(1), 37–46. <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1249-z>

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	Принадлежность к организации
<p>Rodica Siminiuc, Doctor, Associate Professor, Department of Food and Nutrition, Technical University of Moldova bd. Ștefan cel Mare, 168, Chișinău, Moldova, MD-2004 E-mail: rodica.siminiuc@adm.utm.md ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4257-1840 * corresponding author</p>	<p>Симинюк Родика Ивановна — Доктор, профессор, Кафедра пищевых продуктов и питания, Технический Университет Молдовы Республика Молдова, Кишинев, бул. Штефан чел Маре, 168, MD-2004 E-mail: rodica.siminiuc@adm.utm.md ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4257-1840 * автор для контактов</p>
<p>Dinu Țurcanu, Doctor, Associate Professor, Department of Food and Nutrition, Technical University of Moldova bd. Ștefan cel Mare, 168, Chișinău, Moldova, MD-2004 E-mail: dinu.turcanu@adm.utm.md ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5540-4246</p>	<p>Цуркану Дину Николаевич — доктор, профессор, Кафедра пищевых продуктов и питания, Технический Университет Молдовы Республика Молдова, Кишинев, бул. Штефан чел Маре, 168, MD-2004 E-mail: dinu.turcanu@adm.utm.md ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5540-4246</p>
Contribution	Критерии авторства
<p>Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.</p>	<p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.</p>
Conflict of interest	Конфликт интересов
<p>The authors declare no conflict of interest.</p>	<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-106-118>



Поступила 26.09.2025

Поступила после рецензирования 16.03.2026

Принята в печать 19.03.2026

© Кудинов Р. Е., Кременевская М. И., Ситникова В. Е., Федоров А. В., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ СТАБИЛИЗАТОРА И ВРЕМЕНИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ НА ХРАНЕНИЕ СВЕКОЛЬНОГО СОКА

Кудинов Р. Е.^{1*}, Кременевская М. И.¹, Ситникова В. Е.¹, Федоров А. В.^{1,2}

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт жиров, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

сок свеклы,
концентрат,
стабилизатор,
бетанин,
натуральный
краситель,
ИК-спектроскопия

Учитывая возросший интерес к природным свекольным беталаинам, остро стоит вопрос о производстве природных пигментов этого класса. Применение концентратов, вырабатываемых из сока корнеплодов столовой свеклы, востребовано в пищевой, фармацевтической и медицинской отраслях. Заданные отраслевым потребителем свойства предполагают получение стабильной системы в процессе длительного хранения с сохранением бетанина, обладающего антиоксидантной активностью. Изучали стабилизирующие свойства лимонной кислоты (0,5%) и смеси лимонной (0,25%) и аскорбиновой (0,25%) кислот на оптические свойства свекольного сока сорта «Бордо-237» в процессах концентрирования и последующего хранения при температуре $4 \pm 0,5^\circ\text{C}$ методами химического анализа, электронной и Фурье-ИК-спектроскопии. Определено влияние природы стабилизирующих агентов на кинетику изменений содержания бетанина и состав белково-углеводных компонентов в процессе концентрирования свекольного сока. Установлено, что природа стабилизатора при незначительном изменении pH свекольного сока в процессе концентрирования, оказывает стабилизирующее действие на бетанин. Увеличение его содержания по отношению к образцу без стабилизатора (0,20%) достигает 0,39% в образце сока с лимонной кислотой и 0,35% в образце сока, стабилизированного лимонной и аскорбиновой кислотами. Введение лимонной кислоты заметно изменяло кинетику изменений содержания бетанина и состав белково-углеводных компонентов в процессе концентрирования свекольного сока. При смещении максимума полосы 540 нм в положение 535 нм снижалась выраженность полосы 490 нм и больше проявлялась слабая по интенсивности полоса 455 нм. Определено, что деградация бетанина в концентратах свекольного сока зависит от времени концентрирования. Изменение спектральных характеристик от времени концентрирования характеризуется задержкой до 10 минут процесса, с последующим резким подъемом. Наилучшие показатели системы достигаются в процессе концентрирования в течении 15 минут при температуре $60 \pm 0,2^\circ\text{C}$ и давлении 72 ± 10 мбар. Минимальные потери бетанина в концентратах, стабилизированных лимонной кислотой, после четырех месяцев холодильного хранения при температуре $4 \pm 0,5^\circ\text{C}$, составили 5%.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность доктору химических наук, профессору А. П. Нечипоренко за консультативную помощь в интерпретации спектральных данных в исследованиях по Фурье ИК спектроскопии.

Received 26.09.2025

Accepted in revised 16.03.2026

Accepted for publication 19.03.2026

© Kudinov R. E., Kremenevskaya M. I., Sitnikova V. E., Fedorov A. V., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

EFFECT OF STABILIZER NATURE AND CONCENTRATION TIME ON STORAGE OF BEET JUICE

Roman E. Kudinov^{1*}, Marianna I. Kremenevskaya¹, Vera E. Sitnikova¹, Alexander V. Fedorov^{1,2}

¹ ITMO University, Saint Petersburg, Russia

² All-Russian Scientific Research Institute of Fats, Saint Petersburg, Russia

KEYWORDS:

beetroot juice,
concentrate, stabilizer,
betanin, natural dye,
IR spectroscopy

ABSTRACT

Given the growing interest in natural beetroot betalains, the production of natural pigments of this class is a pressing issue. Concentrates produced from beetroot juice are in demand in the food, pharmaceutical, and medical industries. The properties specified by industry consumers require a stable system during long-term storage, preserving betanin, which has antioxidant activity. The stabilizing properties of citric acid (0.5%) and a mixture of citric (0.25%) and ascorbic (0.25%) acids on the optical properties of Bordeaux-237 beet juice were studied during concentration and subsequent storage at $4 \pm 0.5^\circ\text{C}$ using chemical analysis, electron microscopy, and Fourier transform infrared spectroscopy. The influence of the nature of the stabilizing agents on the kinetics of changes in betanin content and the composition of protein-carbohydrate components during beet juice concentration was determined. It was found that the nature of the stabilizer exerts a stabilizing effect on betanin, even with minor changes in beetroot juice pH during concentration. The increase in betanin content relative to the sample without the stabilizer (0.20%) reached 0.39% in the juice sample with citric acid and 0.35% in the juice sample stabilized with citric and ascorbic acids. The addition of citric acid significantly altered the concentration kinetics. As the 540 nm band maximum shifted to 535 nm, the 490 nm band decreased in intensity, and the weaker 455 nm band became more prominent. Betanin degradation in beetroot juice concentrates was determined to depend on concentration time. The change in spectral characteristics with concentration time is characterized by a delay of up to 10 minutes, followed by a sharp increase. The best system performance is achieved with a 15-minute concentration at a temperature of $60 \pm 0.2^\circ\text{C}$ and a pressure of 72 ± 10 mbar. The minimum betanin loss in concentrates stabilized with citric acid after four months of refrigerated storage at $4 \pm 0.5^\circ\text{C}$ was 5%.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors are deeply grateful to the Doctor of Chemical Sciences, Professor A. P. Nechiporenko for help in conducting research on Fourier IR spectrometry.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кудинов, Р. Е., Кременевская, М. И., Ситникова, В. Е., Федоров, А. В. (2026). Влияние природы стабилизатора и времени концентрирования на хранение свекольного сока. *Пищевые системы*, 9(1), 106–118. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-106-118>

FOR CITATION: Kudinov, R. E., Kremenevskaya, M. I., Sitnikova, V. E., Fedorov, A. V. (2026). Effect of stabilizer nature and concentration time on storage of beet juice. *Food Systems*, 9(1), 106–118. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-106-118>

1. Введение

Сроки холодильного хранения сока или концентратов сока из овощного сырья зависят от выбора стабилизаторов и режимов концентрирования, позволяющих сохранить цвет продукта [1]. Особенности предварительной обработки сокодержущего сырья предполагают знание влияния веществ и процессов, стабилизирующих цвет в течение длительного времени. Для решения задач, связанных с применением полученных красящих пищевых продуктов, необходимы дополнительные исследования с использованием различных методов.

Цветовые характеристики представляются одними из важнейших в логистике продвижения продуктов на рынке питания. Исследования пластидных и непластидных пигментов растительных ресурсов направлены на учёт индивидуальной сенсорной оценки человеческого глаза. Его достаточно узкий спектр информационного восприятия световых частот определяет граничные условия при создании продуктов заданных цветовых оттенков. В кондитерских изделиях наиболее часто применяются различные оттенки красного цвета. Наибольший интерес представляют красители, полученные из органического сырья. Пигменты плодовых, ягодных и овощных культур, обладающих цветовой гаммой розово-фиолетовой, оранжево-жёлто-красной и зелёной окраски наиболее изучены. Антоциан-, каротин- и хлорофиллсодержащие растения благодаря наличию биологически активных веществ, обладают доказанным влиянием на состояние организма человека [2,3].

Бетаниносодержащее сырьё в пищевых системах может рассматриваться не только, как красящее, но и содержащее полезные для здоровья вещества [4–7]. Поступающие с пищей биоактивные соединения обладают антиоксидантной [8,9] и противоопухолевой [10–13] активностью. Отмечается интерес в их применении для пищевых [14], фармакопейных [15–17] и медицинских [18–20] нужд. Междисциплинарный интерес способствует проведению дополнительных исследований и получению новых сведений о продукте с использованием различных методов. Наряду с традиционной спектрофотометрией в УФ и видимой областях, все шире начинают использоваться такие высокочувствительные и информативные инструментальные методы анализа, как ИК-, ЯМР-, Масс-спектрометрия [21–23].

Сегодня ИК-спектрометрия представлена в формате классической и экспресс-версии, не требующей специальной предварительной пробоподготовки образца — Фурье ИК-спектрометрии. Метод позволяет идентифицировать совокупность данных физических, химических и биологических факторов воздействия на исследуемые ингредиенты. Это важно при создании эмульсий или дисперсий белково-полисахаридных структур, где определяющими являются стабильность системы и ее биологически активных веществ [24,25]. Спектральные исследования не всегда имеют систематизированный характер. Наблюдаются разночтения фрагментарного описания спектров красящих веществ по форме, структуре, интенсивности и положению полос по шкале волновых чисел [21–23]. Различие результатов исследований во многом связано с нестандартными условиями получения спектра, что вносит значительную погрешность в их интерпретацию.

Важнейшими факторами стабильности продукции из бетаниносодержащего сырья являются его физико-химические показатели, способы технологической и термической обработки, агрегатное состояние конечного продукта [26]. Предотвращение инактивации биологически активных веществ (БАВ) является первоочередной задачей при разработке функциональных продуктов питания. Отмечается, что применение распылительной сушки [27], ультразвука [28], использование гомогенизаторов высокого давления [29] способствуют уменьшению содержания БАВ и увеличивают стоимость продукции. Для стабильности беталаинов сока и его концентратов, полученных из *Beta Vulgaris*, применяют и органические кислоты. Предпочтение отдают лимонной кислоте по ряду причин. Ее наличие способствует ускорению метаболических процессов в организме человека, связанных с липидно-углеводным обменом [30,31].

Для усиления красящей способности пищевой системы применяют концентрирование свекольного сока. Определение параметров данного процесса должно быть направлено не только на сохранение бетанина и других БАВ. Необходимо учитывать высокое содержание моно- и дисахаридов в соке во избежание реакции карамелизации. Режимы концентрирования должны обеспечивать максимальное сохранение пигмента, качество концентрата и необходимую длительность его холодильного хранения [32]. Концентрирование сока осуществляют в выпарных установках. В зависимости от их конструктивных особенностей и режимов процесс осуществляется

в температурном диапазоне 5–60 °С [33] до содержания сухих веществ (СВ) 55–75 % [34].

Цель работы заключалась в исследовании влияния природы стабилизатора и времени концентрирования на оптические свойства свекольного сока и его концентратов в процессе холодильного хранения с использованием методов химического анализа, электронной и Фурье ИК-спектрометрии.

2. Объекты и методы

2.1. Сок свеклы

Для получения сока использовали корнеплоды столовой свеклы сорта «Бордо 237», выращенные в юго-западном регионе Ленинградской области. Вымытые и очищенные корнеплоды разрезали на кусочки и пропускали через соковыжималку JU655 (Moulinex, Китай) при скорости вращения ротора $n = 12000$ об/мин. Для удаления возможных твердых фракционных включений проводили фильтрацию с помощью вакуумного электронасоса VE215N (Value, Китай) и сита из нержавеющей стали, с диаметром отверстий 0,1 мм.

2.2. Стабилизация

Для стабилизации красящего пигмента (бетанина) в соке использовали лимонную кислоту (99,8 %) (ТТСА. Со., LTD, Китай) и аскорбиновую кислоту (99,7 %) (Hugestone Enterprise Co., LTD, Китай).

Объектами исследований являлись 3 серии образцов свекольного сока и концентратов:

- 1 — свекольный сок и концентраты без стабилизатора;
- 2 — свекольный сок и концентраты с добавлением лимонной кислоты (0,5 %);
- 3 — свекольный сок и концентраты с добавлением смеси лимонной (0,25 %) + аскорбиновой кислот (0,25 %).

2.3. Определение pH

Для определения pH полученного сока использовали цифровой pH-метр/кондуктометр S213 (серия SevenCompact Duo, METTLER TOLEDO, Швейцария). Перед измерением pH-метр был откалиброван с использованием стандартных буферных растворов со значениями pH 3,56 и 9,14.

2.4. Определение содержания сухих веществ (СВ)

Определение содержания СВ в образцах свекольного сока проводили ускоренным инфракрасным термогравиметрическим методом при температуре 120 ± 5 °С. Масса образца составила $0,5 \pm 0,05$ г. Измерения осуществляли на анализаторе влажности галогенного HR-83 (METTLER TOLEDO, Швейцария).

2.5. Концентрирование

Концентрирование сока свеклы осуществляли на ротационном испарителе марки RV 10 (ИКА, Германия) при температуре $60 \pm 0,2$ °С, давлении 72 ± 10 мбар, в течение 5,10,15 минут. После концентрирования образцы хранили при температуре $4 \pm 0,5$ °С в течении 4-х месяцев.

2.6. Определение содержания бетанина

Содержание бетанина в 0,1 % растворах образцов сока свеклы определяли на спектрофотометре UNICO 2100 (United Products & Instruments, США), согласно ТР ТС 029/2012¹ (Приложение 28). Расчет массовой доли (С, %) бетанина определяли по формуле:

$$C = \frac{A_{535} \times 100}{1120 \times l \times m}, \quad (1)$$

где: А — оптическая плотность при $\lambda = 535$ нм; 1120 — удельное поглощение 1 % раствора бетанина в 1 см; l — длина кюветы, равная 1 см; m — масса образца, г.

2.7. Спектрометрический анализ

Исследование оптических свойств образцов свекольного сока и его концентратов проводили методами электронной (в диапазоне длин волн 200–700 нм) и Фурье ИК-спектрометрии (в диапазоне частот 4000–600 см⁻¹). Для записи электронных спектров 0,1 % растворов сока и концентратов в кварцевых кюветках с длиной оптического пути 1,0 см использовали спектрофлуориметр CM 2203 (СОЛАР, Беларусь).

Для визуализации и сравнения спектральных характеристик по фактуре полос сока и его концентратов в УФ области спектра использовали вспомогательные вещества: 20 и 40 % растворы сахарозы (Россия), 0,75; 0,50; 0,25; 0,125; 0,0625 % растворы яичного альбумина

¹ ТР ТС 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств» (Утвержден решением Совета Евразийской экономической комиссии 20 июля 2012 г., № 58. Электронный ресурс <https://docs.cntd.ru/document/902359401> Дата обращения 21.08.2025.

(РОСКАР, Россия), нативный яичный белок куриных яиц, купленных на местном рынке и его 0,5 и 1% растворы.

Колебательные спектры (32 скана) образцов получали на Фурье-спектрометре Tensor 37 (Bruker, Германия) с алмазным НПВО элементом, управляемым программным пакетом OPUS со стандартными градуировочными возможностями в формате поглощения. Полученные результаты обрабатывались в программе Origin 2021.

2.7.1. Подготовка образцов для Фурье ИК-спектроскопии

Образцы свекольного сока и концентратов с помощью пипетки Пастера наносили на предметные стекла размером 75×25×1,2 мм (Микромед, Россия), которые оставляли в изолированном от света месте при температуре 23±0,5°C до полного высыхания. Такая пробоподготовка позволяет чётко идентифицировать результаты, исключая погрешности их разночтения, вносимые водой.

2.8. Статистический анализ

Исследования проводили с необходимой кратностью, обеспечивающей доверительный интервал случайной погрешности результата измерения P ≥ 0,95. Различия средних значений выборок с применением критерия Стьюдента признавали статистически достоверными при доверительной вероятности P < 0,05. При статистической обработке экспериментальных результатов использовали программы Microsoft Excel Office 2019 и OriginPro (пробная версия, OriginLab), США. Анализ спектральных данных интерпретировали после предварительной обработки, сопоставления спектров в библиотеке прибора и коррекции базовой линии.

3. Результаты и обсуждение

Использование свекольного сока или его концентратов в качестве ингредиента в составе функциональных пищевых продуктов, в том числе эмульсий, связано с увеличением сроков хранения [35]. Определение стабилизаторов цвета и режимы процесса концентрирования соков играют решающую роль в изменении красящих веществ и продолжительности хранения продукта.

3.1. Химический анализ

Влияние природы стабилизатора оценивали по содержанию красящего вещества — бетанина, который отвечает за цвет свекольного сока и является определяющим показателем его качества. Концентрирование трех серий образцов свекольного сока проводили до содержания СВ 57–59% [33]. Анализ данных в Таблице 1 показал, что природа стабилизатора не оказывает существенного влияния

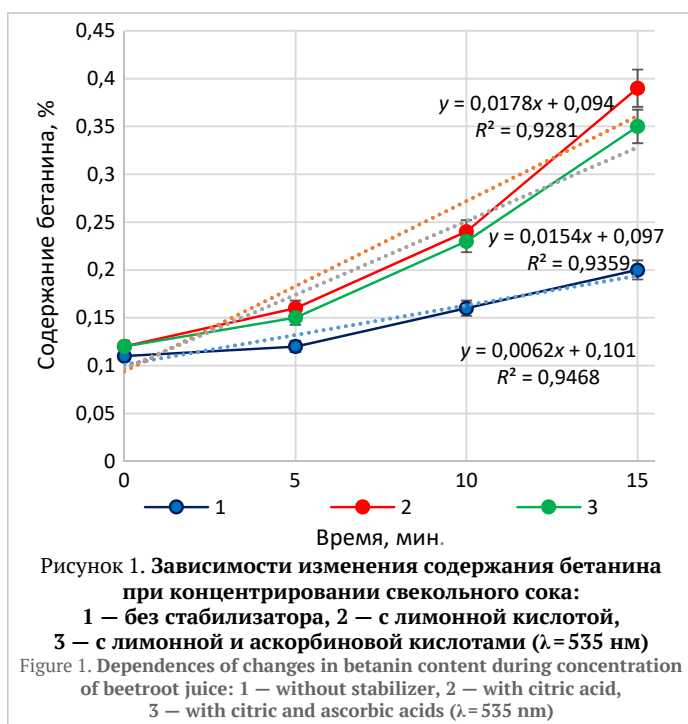


Рисунок 1. Зависимости изменения содержания бетанина при концентрировании свекольного сока: 1 — без стабилизатора, 2 — с лимонной кислотой, 3 — с лимонной и аскорбиновой кислотами (λ = 535 nm)

на кислотность свекольного сока в процессе концентрирования. Но стабилизирующую роль кислот подтверждает содержание бетанина после концентрирования (15 минут), которое почти в 2 раза больше по сравнению с соком без стабилизатора. Кинетика процесса концентрирования, представленная на Рисунке 1 также показала стабилизирующую роль кислот. Скорость концентрирования после 10 минут резко возрастает в образцах сока со стабилизирующими компонентами в отличие от образца без стабилизатора.

Деградация бетанина в процессе холодильного хранения в течение 1–2–4 месяцев (Рисунок 2) напрямую зависела от консистенции образцов свекольного сока, которая определялась временем концентрирования и присутствием стабилизатора. Только концентрирование

Таблица 1. Влияние природы стабилизатора на показатели свекольного сока

Table 1. The influence of the nature of the stabilizer on the properties of beetroot juice

Стабилизатор	рН		Содержание СВ, %		Содержание бетанина, %	
	1	2	1	2	1	2
Без стабилизатора	6,10±0,11 ^a	6,15±0,11 ^a	13,4±0,20 ^a	58±1 ^a	0,110±0,002 ^a	0,200±0,005 ^a
Кислоты:						
Лимонная	4,30±0,10 ^b	4,35±0,10 ^b	13,9±0,20 ^a	58±1 ^a	0,120±0,003 ^b	0,390±0,005 ^b
Лимонная+аскорбиновая	4,50±0,11 ^b	4,55±0,11 ^b	13,9±0,20 ^a	58±1 ^a	0,120±0,003 ^b	0,350±0,005 ^c

1 — до концентрирования; 2 — после 15 минут концентрирования.

Примечание: Одинаковыми надстрочными латинскими буквами обозначены статистически не различающиеся между собой и по сравнению с контролем при P < 0,05 (по критерию Стьюдента).

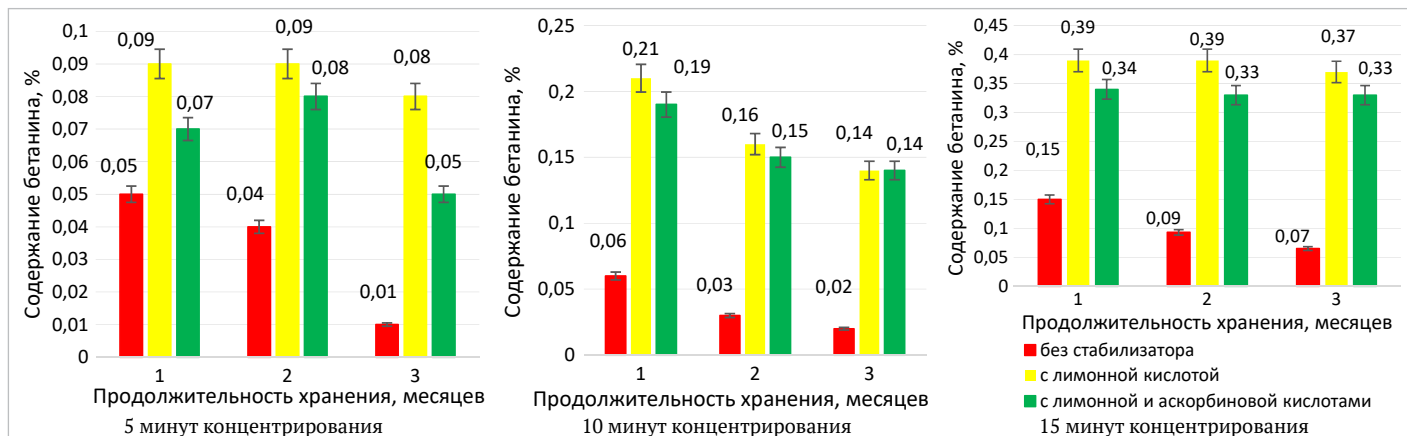


Рисунок 2. Изменение содержания бетанина в образцах свекольного сока в зависимости от времени концентрирования и природы стабилизирующих веществ в процессе хранения: 1 — 1; 2 — 2; 3 — 4 месяцев

Figure 2. Changes in betanin content in beetroot juice samples depending on the concentration time and the nature of stabilizing substances during storage: 1 — 1; 2 — 2; 3 — 4 months

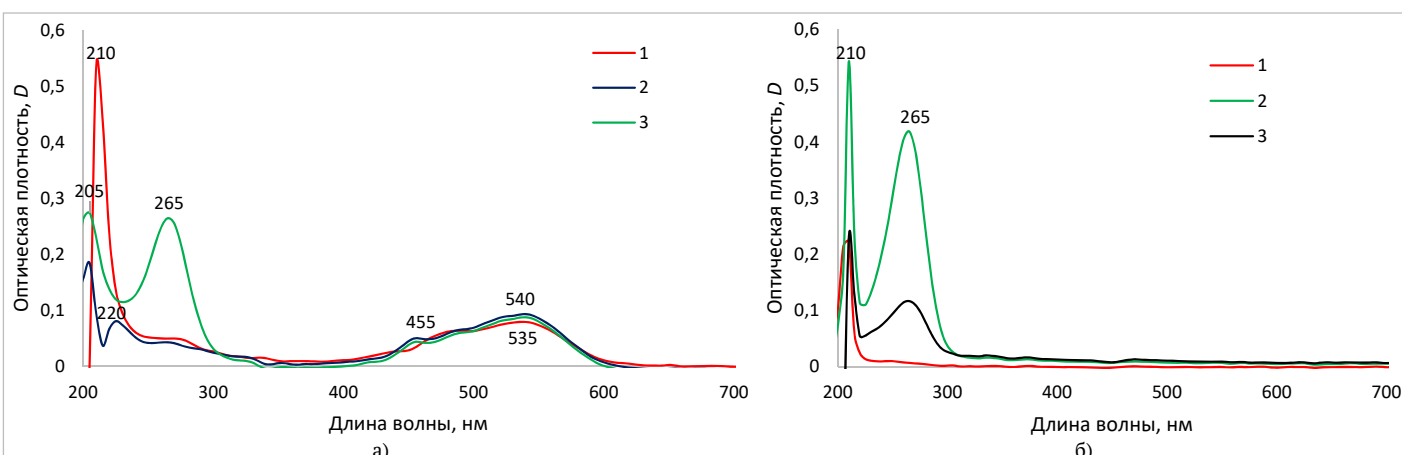


Рисунок 3. Электронные спектры свекольного сока: а) 1 – без стабилизатора, 2 – с лимонной кислотой, 3 – с лимонной и аскорбиновой кислотами; б) растворов: 1 – лимонная кислота (0,5%); 2 – аскорбиновая кислота (0,5%); 3 – лимонная (0,25%) и аскорбиновая (0,25%) кислоты

Figure 3. Electronic spectra of beetroot juice: а) 1 – without stabilizer, 2 – with citric acid, 3 – with citric and ascorbic acids; б) solutions: 1 – citric acid (0.5%); 2 – ascorbic acid (0.5%); 3 – citric (0.25%) and ascorbic (0.25%) acids

в течение 15 минут свекольного сока, стабилизированного лимонной кислотой, лимонной и аскорбиновой кислотами сохраняет бетанин в течение 4-х месяцев. Деградация бетанина составила 5%. В соке без стабилизатора содержание бетанина снизилось на 67,5%.

Добавление аскорбиновой кислоты в количестве 0,25% к лимонной не оказало значительного влияния на изменения содержания бетанина при концентрировании, поэтому целесообразно использовать в качестве стабилизатора лимонную кислоту [30,36]. Исследователями в [37] было установлено, что добавление 1% аскорбиновой кислоты обеспечивает максимальную стабильность беталаинов. Основываясь на представленных нами результатах, можно заключить, что использование 0,5% более дешевой для производственных нужд лимонной кислоты является достаточным условием для сохранения бетанина в концентратах из свеклы.

3.2. Электронная спектроскопия

Добавление в свекольный сок лимонной кислоты и смеси лимонной и аскорбиновой кислот (Рисунок 3), незначительно изменило фактуру полосы красителя, проявляясь в появлении небольшой полосы 455 нм и смещении максимума бетанина 535 нм в положение 540 нм. Введение стабилизаторов незначительно увеличило содержание бетанина, что подтверждает химический анализ.

Основные изменения наблюдались в УФ области спектра. Введение в свекольный сок лимонной кислоты резко снижало интенсивность полосы 210 нм в спектре сока и ее распада на две – 205 и 220 нм, не затрагивая слабо выраженную полосу 265 нм. При добавлении в систему аскорбиновой кислоты, полоса 205 нм возрастала по интенсивности, а в области 265 нм дифференцировалась достаточно интенсивная полоса. Обе полосы могут свидетельствовать о присутствии в образцах сока как стабилизатора, так и протеиновых компонентов – пептидная связь в области 190–210 нм и ароматические аминокислоты (триптофан, тирозин) в области 260–275 нм [38]. Кроме того, в данном диапазоне могут поглощать и сахара, присутствующие в свекольном соке в большом количестве.

Анализ спектров растворов стабилизаторов (Рисунок 3б) показал, что для них, как и для свекольного сока характерна полоса 210 нм. В спектре раствора лимонной кислоты полоса 265 нм отсутствовала, а в спектре аскорбиновой кислоты ее наличие обусловлено кольцевой структурой в составе молекулы (Рисунок 4б).

Изменение спектральных характеристик от времени концентрирования иллюстрирует Рисунок 5. Для всех трех серий образцов свекольного сока отмечена задержка в изменении спектра до 10 минут процесса концентрирования и резкий подъем после. При этом

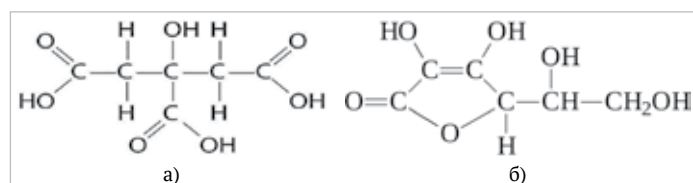


Рисунок 4. Структурная формула кислот: а) лимонная, б) аскорбиновая

Figure 2. Structural formula of acids: а) citric, б) ascorbic

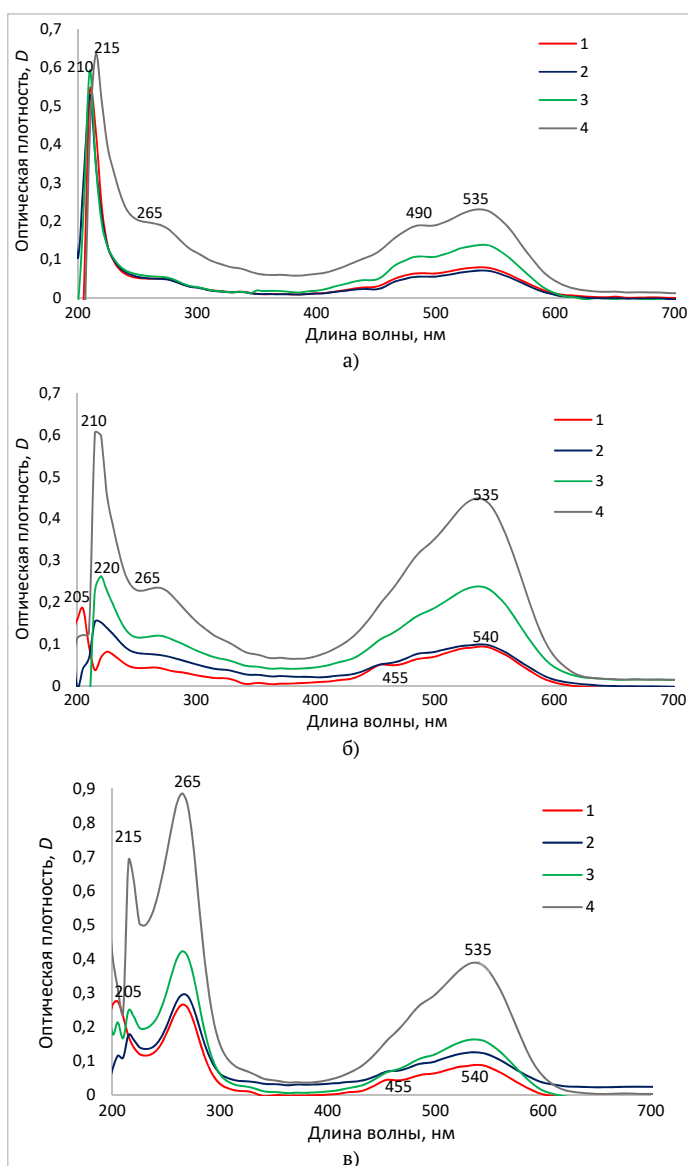


Рисунок 5. Электронные спектры концентратов свекольного сока: а) без стабилизатора, б) с лимонной кислотой, в) с лимонной и аскорбиновой кислотами; время концентрирования: 1 – 0, 2 – 5, 3 – 10, 4 – 15 минут

Figure 5. Electronic spectra of beetroot juice concentrates: а) without stabilizer, б) with citric acid, в) with citric and ascorbic acids; concentration time: 1 – 0, 2 – 5, 3 – 10, 4 – 15 minutes

основные полосы бетанина 535 и 490 нм не меняли своего положения по шкале длин волн [32], а полоса 210 нм в спектре-4 занимает положение 215 нм.

Введение лимонной кислоты заметно изменяло кинетику концентрирования (Рисунок 5б). При смещении максимума полосы 540 нм в положение 535 нм снижалась выраженность полосы 490 нм и больше проявлялась слабая по интенсивности полоса 455 нм. В УФ области полоса 220 нм, заметно увеличивалась по интенсивности, в спектре последнего образца переходила в положение 210 нм, а полоса 205 нм при этом, снижаясь по интенсивности, последовательно смещалась в зону вакуумного ультрафиолета.

Добавление в систему аскорбиновой кислоты (Рисунок 5в) также существенно отражалось на кинетике концентрирования, отличаясь от кинетики концентрирования сока с одной лимонной кислотой по изменению интенсивности всех полос. Следует обратить внимание, во-первых, на то, что максимум 540 нм перешел в положение 535 нм, как и в спектрах последних концентратов сока с лимонной кислотой [21]. В данном случае также проявлялась полоса 455 нм и сглаживалась 490 нм. И, во-вторых, характер изменения интенсивности полос 215/265 нм и состава полос в области 205–215 нм в ходе процесса концентрирования. В спектре 1 в этой области имелась небольшая, несколько уширенная полоса 205 нм, которая через 5 минут концентрирования преобразовывалась в дублет 205/215 нм и снижалась по интенсивности. К 10 минутам интенсивность дублета возрастала, но через 15 минут дублет распадался. Полоса 215 нм сохраняла свое положение, а полоса 205 нм смещалась в область вакуумного ультрафиолета. Отмеченное указывает на то, что природа стабилизатора заметно сказывается не только на кинетике изменения содержания бетанина (Рисунок 1), но и на характере изменений в составе сопутствующих компонентов системы сока.

Исследования изменений в оптических характеристиках свекольного сока без стабилизатора и его концентратов при хранении (Рисунок 6) показали возможности метода электронной спектроскопии при контроле свойств бетанина, а также состояния сопутствующих и существенно преобладающих углеводно-протеиновых компонентов, претерпевающих заметные изменения.

При хранении свекольного сока без стабилизатора и его концентратов происходила деградация бетанина, что подтверждает резкое снижение интенсивности максимума его красной формы (535 нм) в спектрах образца-4 (Рисунок 6г). В данном эксперименте на при-

мере 4-х образцов свекольного сока без стабилизатора прослеживалось неоднозначное влияние их консистенции на скорость деградации бетанина.

Изменения в УФ части спектра позволили говорить о существенных разрушениях в общей системе свекольного сока при концентрировании. А также об увеличении скорости достижения равновесия, как в любой жидкой биологической системе, спонтанно стремящейся к энергетической стабильности с увеличением степени концентрирования. Неустойчивость состояния в системе первых двух концентратов сока (Рисунок 6б и Рисунок 6в) прослеживалась на протяжении всего срока хранения по хаотичности полос и фактуре самих спектральных кривых в данном регионе.

И совсем иную картину показал образец-4 на Рисунке 6 г. Четкий стабильный привычный спектр свекольного сока, который полностью изменял свой вид через 2 недели хранения. Полоса 215 нм смещалась в вакуумный ультрафиолет и формировалась интенсивная стабильная полоса с двумя максимумами — 240 и 250 нм и структурированной правой ветвью, в которой просматривались первые признаки проявления протеиновых конструкций. Признаки сахарозы при этом ретушировались образующимися протеиновыми агрегатами, но не исключено, что инициатором их образования являлась та же сахароза.

Данный эксперимент позволил установить влияние основного фактора — консистенции, на скорость и степень деградации бетанина и трансформацию вещественного состава свекольного сока без стабилизатора при хранении, которая задается временем концентрирования. Кроме того, было отмечено явно выраженное последовательное формирование в УФ области структурированной полосы 240–270 нм, имеющей протеиновую природу. Причем происходило это именно при хранении концентратов и не наблюдалось при концентрировании сока. Это позволило говорить о том, что при хранении в системе соков имеют место спонтанные преобразования протеиновых структур с укрупнением их глобул, характер которых определяется консистенцией концентрата.

Очень показателен стабилизирующий эффект обеих кислотных систем в отношении бетанина по сравнению со спектром сока без стабилизатора на протяжении всего срока хранения (Рисунок 7). Однако в УФ области стабилизация оптических свойств в обоих случаях была отмечена только через 2 месяца. Это проявлялось в формировании двух стабильных по положению полос — 215 и 265 нм, характерных для сахарозы (Рисунок 7б и Рисунок 7в).

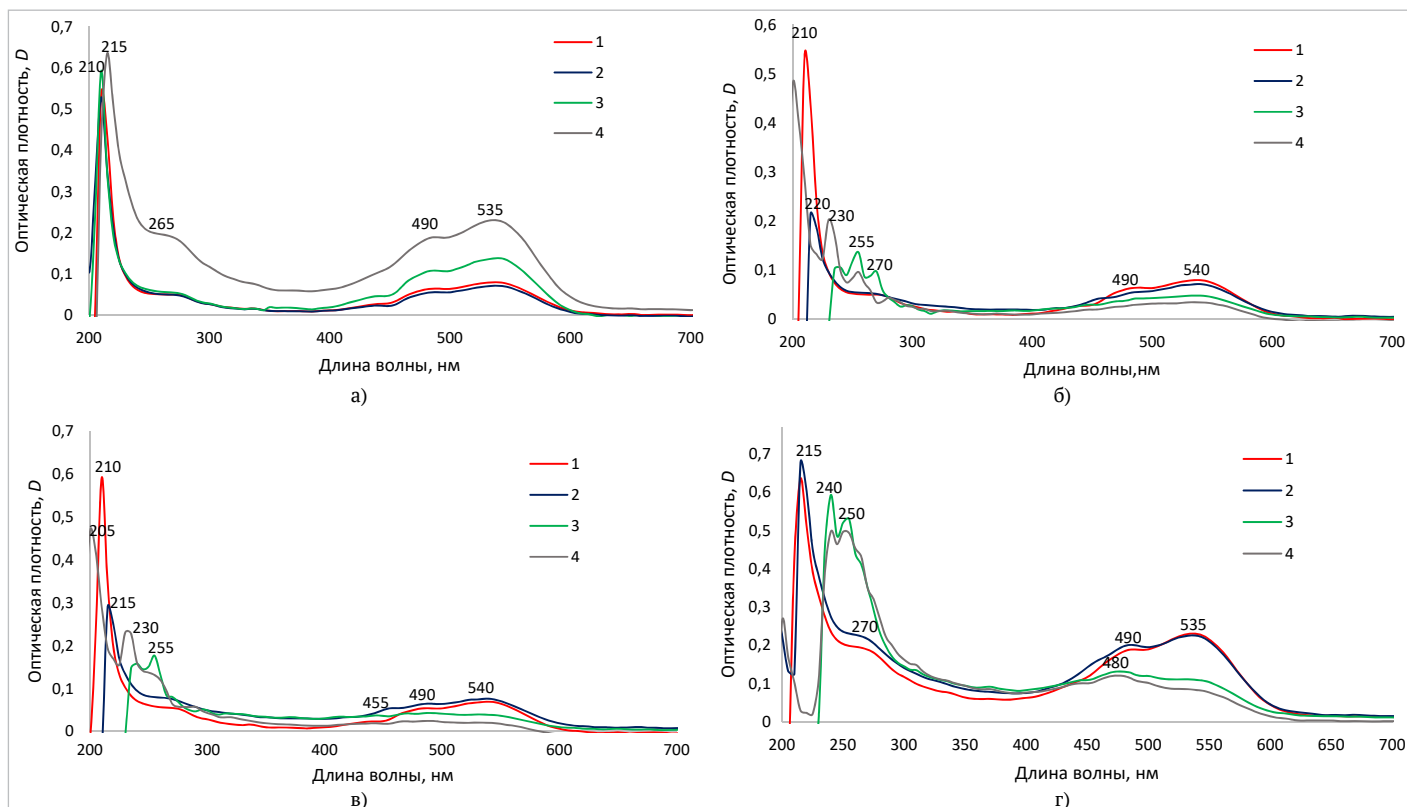


Рисунок 6. Электронные спектры свекольного сока без стабилизатора:

а) исходный, б) 5, в) 10, г) 15 минут концентрирования; 1 — 0, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 4 недели хранения

Figure 6. Electronic spectra of beetroot juice without stabilizer: а) initial, б) 5, в) 10, г) 15 minutes of concentration; 1 — 0, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 4 weeks of storage

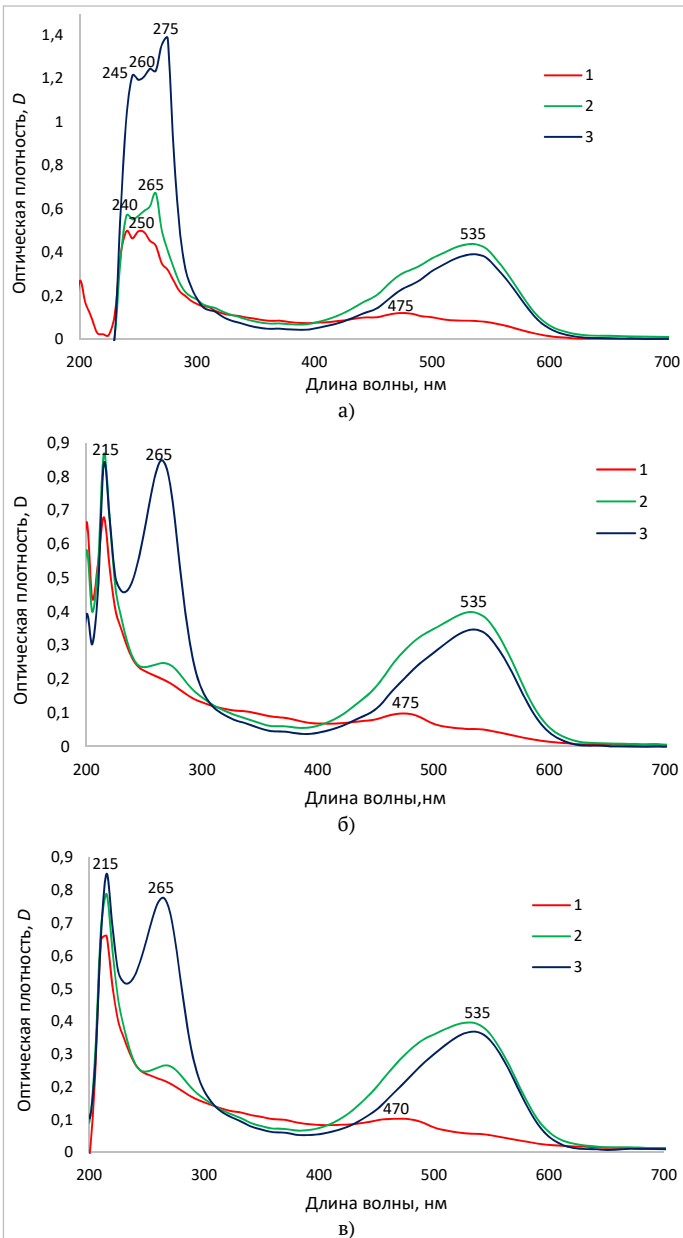


Рисунок 7. Электронные спектры концентратов (15 минут) свекольного сока через: а) один, б) два, в) четыре месяца хранения; 1 – без стабилизатора, 2 – с лимонной кислотой, 3 – с лимонной и аскорбиновой кислотами

Figure 7. Electronic spectra of beetroot juice concentrates (15 minutes) after: a) one, б) two, в) four months of storage; 1 – without stabilizer, 2 – with citric acid, 3 – with citric and ascorbic acids

В спектрах всех рассматриваемых концентратов в УФ области (240–275 нм) через месяц хранения отмечались структурированные полосы. Их наличие говорит о проявленности электронных переходов в молекулах ароматических аминокислот протеиновых компонентов. Однако в течение последующего месяца хранения они исчезали. Отмеченный экспериментальный факт убедителен в иллюстрации серьезных нарушений в целом в системе компонентов свекольного сока в результате процесса концентрирования.

Электронные спектры вспомогательных веществ на Рисунке 8 способствовали визуализации процессов, имеющих место в биологической системе свекольного сока при его хранении. Электронные спектры растворов сахарозы (Рисунок 8а) показали небольшой батохромный (215→220 нм) сдвиг основного максимума с увеличением концентрации, что соответствовало сдвигу максимума в спектрах при хранении концентратов исходного сока (Рисунки 6а, 6б и 6в) и его стабилизации в положении 215 нм в спектрах образца-4 (Рисунок 6г). Полоса 265 нм при этом, возрастала по интенсивности и сохраняла свое положение. На Рисунке 6 она наблюдалась только в спектрах сока, не подвергавшегося концентрированию. Однако, как следует из спектров на Рисунке 7б и Рисунке 7в обе полосы –

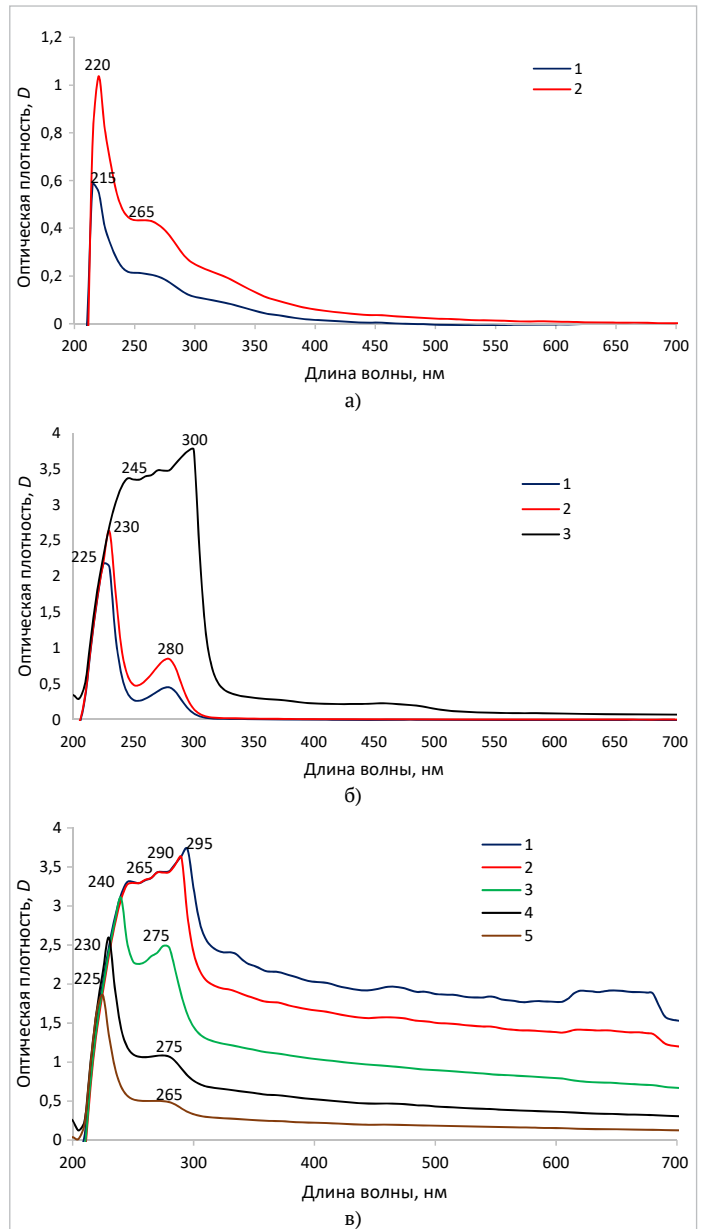


Рисунок 8. Электронные спектры растворов: а) сахарозы: 1 – 20, 2 – 40%; б) яичного белка: 1 – 0,5%, 2 – 1%, 3 – нативный яичный белок; в) яичного альбумина: 1 – 0,75; 2 – 0,50; 3 – 0,25; 4 – 0,125; 5 – 0,0625%

Figure 8. Electronic spectra of solutions: а) sucrose: 1 – 20, 2 – 40%; б) egg white: 1 – 0.5%, 2 – 1%, 3 – native egg white; в) egg albumin: 1 – 0.75; 2 – 0.50; 3 – 0.25; 4 – 0.125; 5 – 0.0625%

215 и 265 нм присутствовали в спектрах обеих серий стабилизированного сока с увеличением срока хранения до 2–4 месяцев.

Спектры растворов яичного белка (Рисунок 8б) и яичного альбумина (Рисунок 8в) при низких концентрациях также показали в области дальнего ультрафиолета две полосы. Накладываясь на полосы в спектрах концентратов свекольного сока, они мешали идентификации. Стоит обратить внимание на контур широкого структурированного максимума интенсивной полосы в спектрах образцов высокой концентрации для обоих протеиновых объектов. Такого характера полосы наблюдались в спектрах концентратов (15 минут) всех трех исследуемых серий свекольного сока через месяц хранения (Рисунок 7а).

3.3. Фурье ИК-спектроскопия

Качество и информативность спектров в методе Фурье ИК-спектроскопии во многом определяется консистенцией образцов [21,23,39]. Для стандартизации условий их записи проведено сравнительное исследование двух способов сушки одного и того же образца концентрата свекольного сока: с использованием воздушной сушки на НПВО элементе прибора с привлечением микро-вентилятора и на предметном стекле при комнатной температуре.

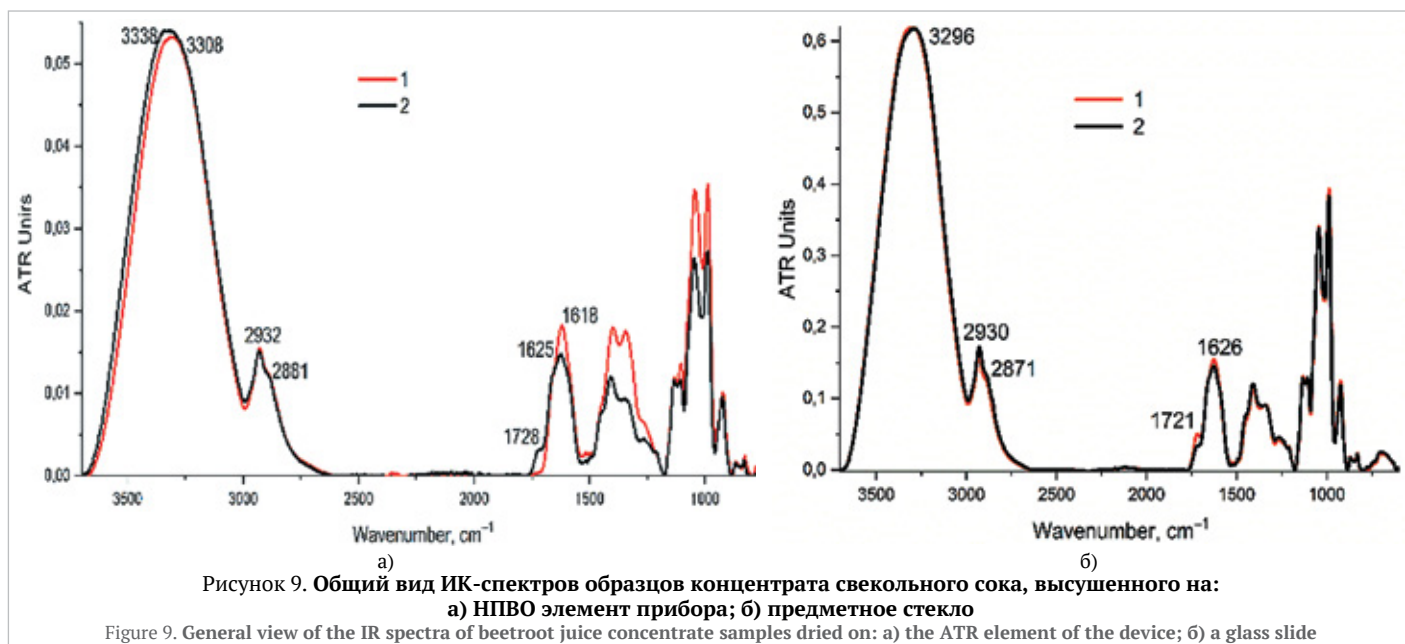


Рисунок 9. Общий вид ИК-спектров образцов концентрата свекольного сока, высушенного на: а) НПВО элемент прибора; б) предметное стекло

Figure 9. General view of the IR spectra of beetroot juice concentrate samples dried on: а) the ATR element of the device; б) a glass slide

Сопоставление спектров показало, что неполное удаление влаги (Рисунок 9а) по-разному отражается на ИК-спектрах образцов в зависимости от их состава, затрудняя интерпретацию. Более четкая проявленность всех полос, воспроизведение их фактуры в спектрах обоих образцов, указывающие на близость по свойствам, и увеличение интенсивности полос на порядок (в 10 раз) при сушке на предметном стекле (Рисунок 9б) послужили основанием для ее использования в эксперименте.

В отличие от электронной спектроскопии метод ИК-спектроскопии не позволил идентифицировать бетанин, содержащий в своей структуре молекулу глюкозы, на фоне высокого содержания сахарозы. На Рисунок 10 представлен общий вид ИК-спектров свекольного сока без стабилизатора и со стабилизаторами. На присутствие стабилизаторов указывает полоса 1718 см^{-1} C=O-группировок лимонной кислоты, заметно снижающаяся по интенсивности после добавления аскорбиновой кислоты. Высокочастотная область спектра ($3700\text{--}2800\text{ см}^{-1}$) в данном случае мало информативна. Здесь суммарно регистрируются гидроксильные группы, в том числе и молекул воды, и C-H_2 -группировки всех компонентов сложной системы свекольного сока. Высокое содержание сахарозы (до 80%), маскирующей любые проявления оптических свойств других составных частей сока, делает его спектр неинформативным. Полоса 1626 см^{-1} , принадлежащая деформационным колебаниям молекул воды, расположена в той же области, где традиционно регистрируются колебания протеиновых структур.

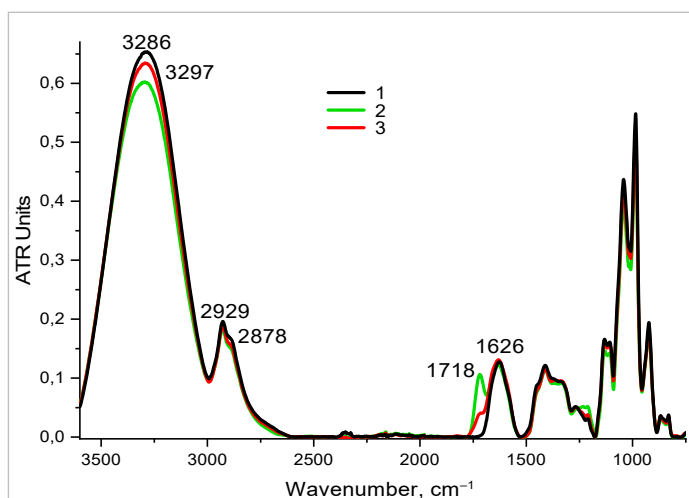


Рисунок 10. Общий вид ИК-спектров свекольного сока: 1 — без стабилизатора, 2 — с лимонной кислотой, 3 — с лимонной и аскорбиновой кислотами

Figure 10. General view of the IR spectra of beetroot juice: 1 — without stabilizer, 2 — with citric acid, 3 — with citric and ascorbic acids

Фрагментирование полученных ИК-спектров и увеличение выделенных фрагментов (Рисунок 11) позволило увидеть доминирование спектрального образа сахарозы по всем ее ярко выраженным индивидуальным оптическим показателям в исходном соке (кр. 1) — дублиты полос $1135/1108$, $1044/988$, $868/831$ и полоса 924 см^{-1} (Рисунок 11а, и Рисунок 11б) [40,41]. На положение их максимумов по шкале волновых чисел не оказывало заметного влияния введение стабилизаторов (кр. 2 и 3), но оно проявлялось в изменении положения полос ($1375\text{--}1370\text{ см}^{-1}$) в составе дублета $1375/1335\text{ см}^{-1}$ (Рисунок 11в), также характерного для сахарозы.

Основные изменения спектральных характеристик сока при введении стабилизаторов наблюдались в диапазонах спектра, где могут проявляться колебания протеиновых компонентов. Это прежде всего область (Рисунок 11г) наиболее характерная для белковых (1631 , 1626 см^{-1}) и пептидных (1576 см^{-1}) структур. Слабо выраженное плечо 1654 см^{-1} на левой ветви центральной полосы может указывать на наличие фрагментов белковых структур α -спирального типа [42]. Более наглядно данную ситуацию иллюстрирует полоса $1268/1210\text{ см}^{-1}$ (Рисунок 11д) в спектре сока без стабилизатора, которая при добавлении лимонной кислоты уширяется с образованием структурированного максимума $1268/1233/1210\text{ см}^{-1}$. Это может говорить о частичной деструкции протеин-сахарозных агломератов с выделением как пептид-углеводных комплексов, так и возможных фосфолипид-углеводных образований ($1240\text{--}1230\text{ см}^{-1}$ [43]). Добавление аскорбиновой кислоты приводит к ее деструкции и формированию полосы очень близкой по фактуре полосе в соке без стабилизатора.

Характеристической полосой 1210 см^{-1} в данном диапазоне проявляла себя и сахароза, что иллюстрирует фрагмент «д» Рисунка 12. Здесь же (Рисунки 12а, 12б и 12в) наилучшим образом представлены и отмеченные выше типичные для сахарозы дублиты полос. Была отмечена симметричная полоса деформационных колебаний воды 1646 см^{-1} (Рисунок 12г), на обеих ветвях которой отсутствуют признаки протеиновых компонентов, как это наблюдалось в спектрах свекольного сока (Рисунок 11г).

Фрагменты ИК-спектров трех серий образцов свекольного сока в процессе концентрирования (Рисунок 13), показали непоследовательность в их расположении, хотя фактура основных полос при этом изменялась незначительно. Это говорит о разной степени устойчивости связей между компонентами системы к внешним воздействиям в процессе концентрирования.

Стабилизирующее влияние лимонной и аскорбиновой кислот при концентрировании лучше всего просматривалось по сохранению формы дублетов сахарозы $1375/1335\text{ см}^{-1}$ (фрагменты «б») и $868/831\text{ см}^{-1}$ (фрагменты «в») по сравнению с образцом свекольного сока без стабилизатора. А структуризация полосы 1628 см^{-1} (фрагменты «г»), где возможно проявление колебаний протеиновых структур, и некоторое увеличение ее интенсивности с введением стабилизаторов, могут указывать на меньшую устойчивость их связей в структуре свекольного сока с повышением кислотности. И здесь наглядно проявляется влияние природы стабилизаторов.

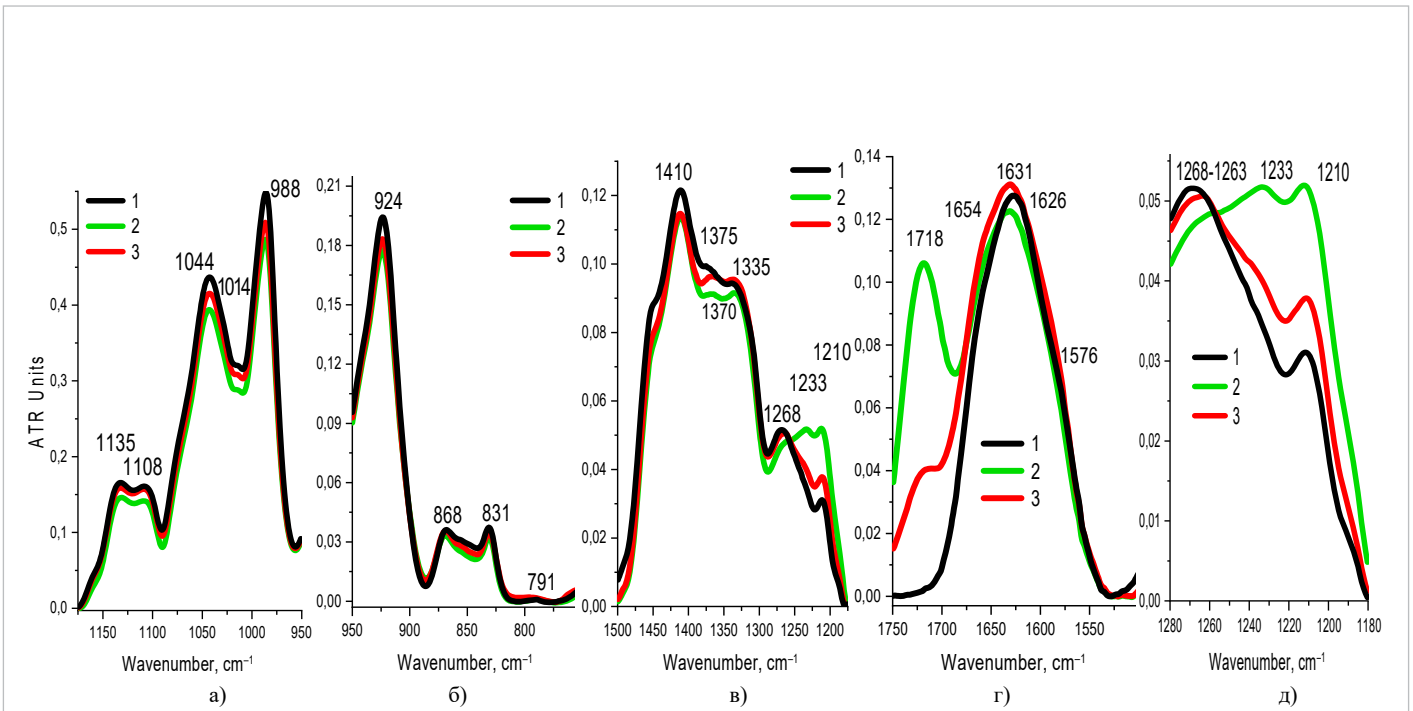


Рисунок 11. Фрагменты ИК-спектров свекольного сока: а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1700–1560, д) 1280–1180 cm^{-1} ; 1 – без стабилизатора, 2 – с лимонной кислотой, 3 – с лимонной и аскорбиновой кислотами

Figure 11. Fragments of the IR spectra of beetroot juice: а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1700–1560, д) 1280–1180 cm^{-1} ; 1 – without stabilizer, 2 – with citric acid, 3 – with citric and ascorbic acids

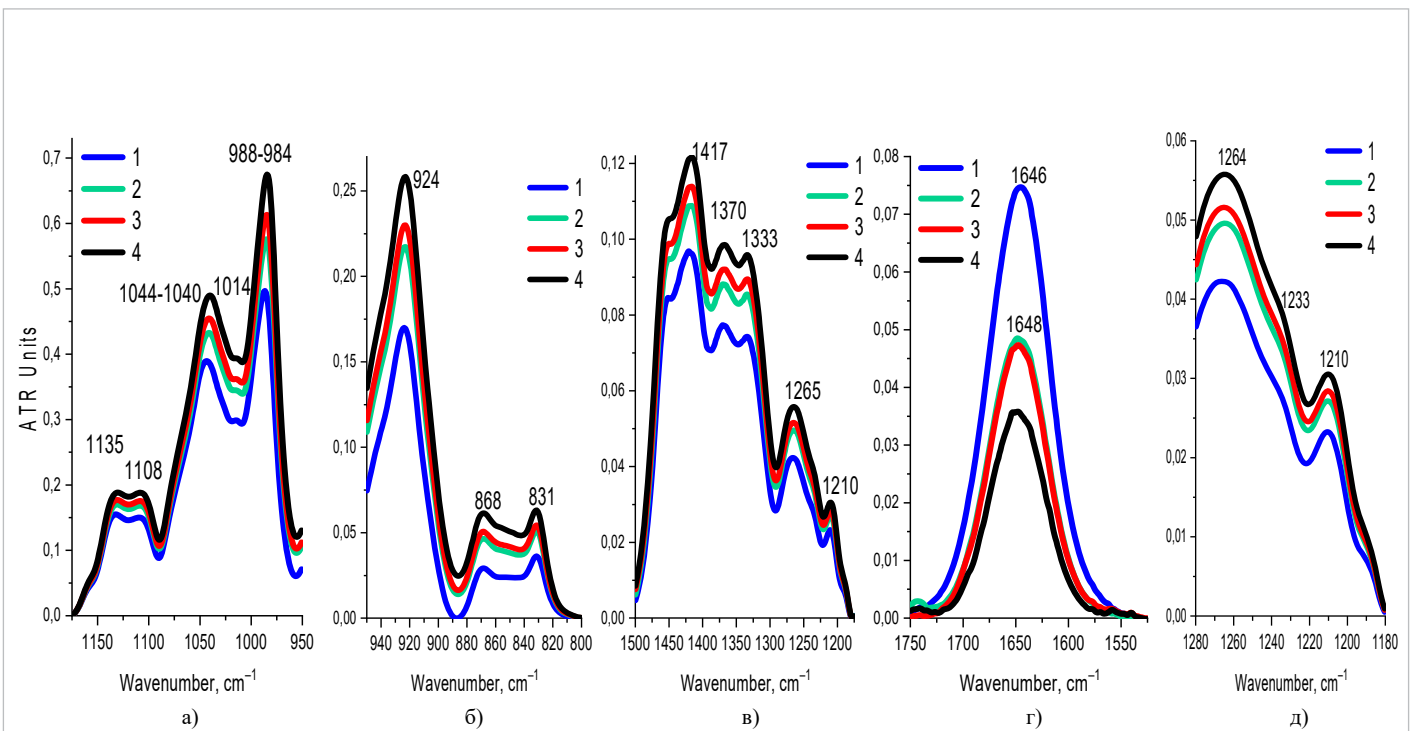
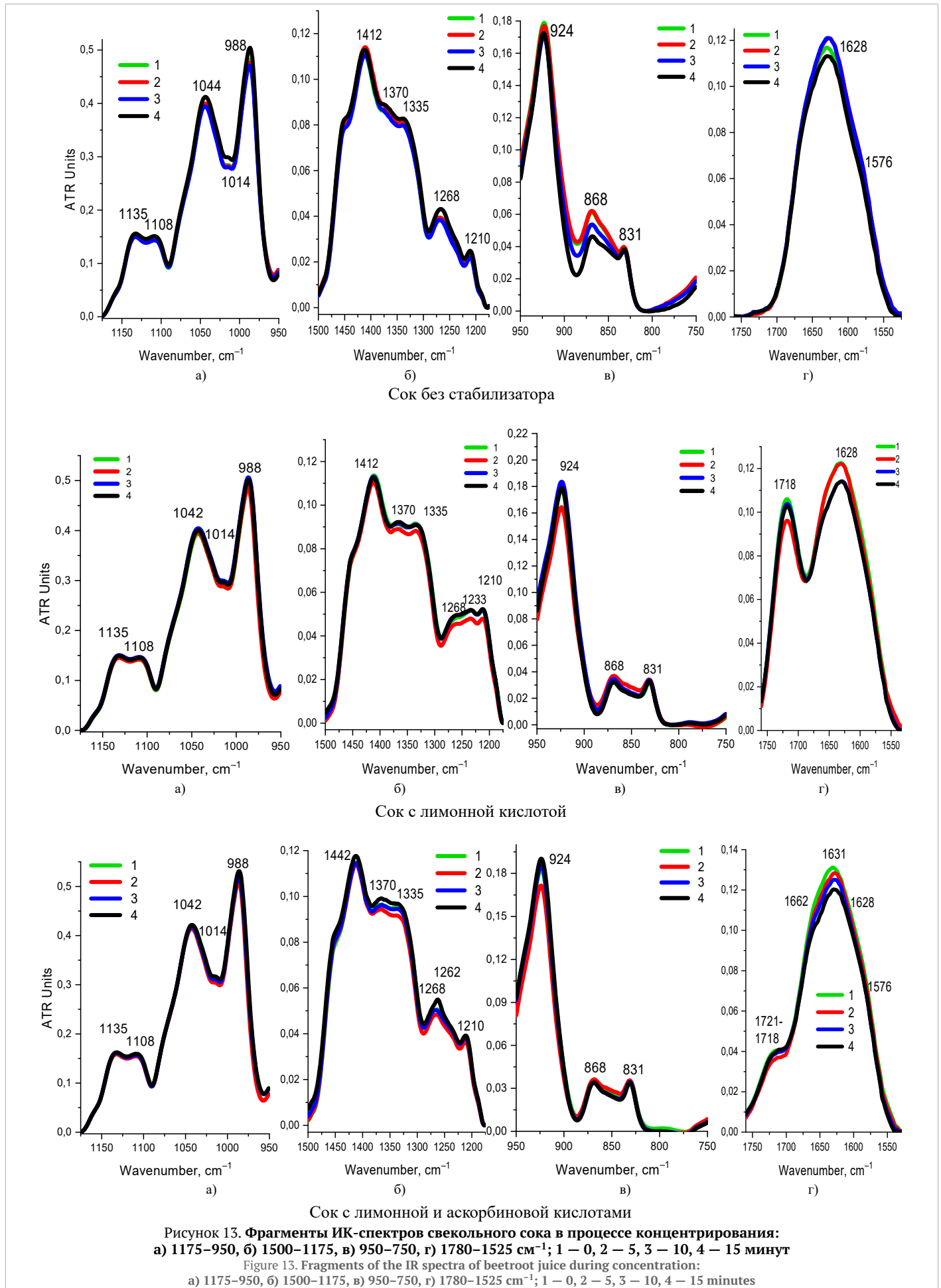


Рисунок 12. Фрагменты ИК-спектров растворов препарата сахарозы: 1–20, 2–40, 3–50, 4–60%; а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1750–1500, д) 1280–1180 cm^{-1}

Figure 12. Fragments of the IR spectra of sucrose preparation solutions: 1–20, 2–40, 3–50, 4–60%; а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1750–1500, д) 1280–1180 cm^{-1}



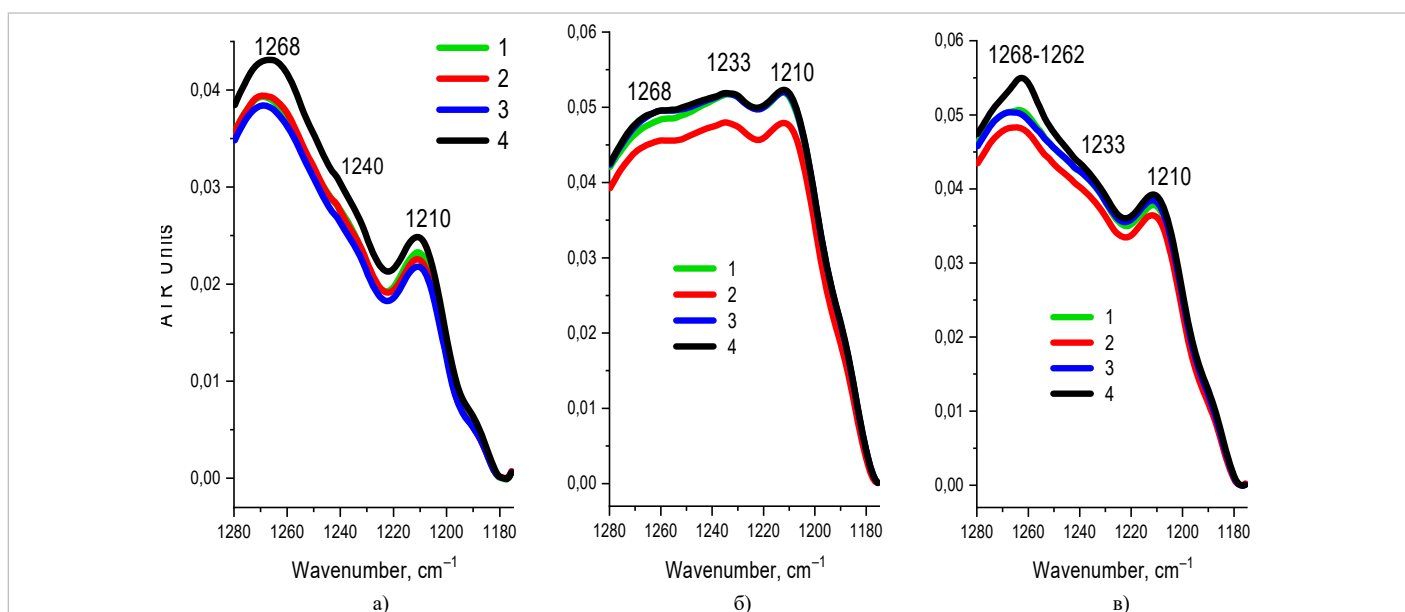


Рисунок 14. Мини фрагменты 1280–1175 cm^{-1} ИК-спектров свекольного сока: а) без стабилизатора, б) с лимонной кислотой, в) с лимонной и аскорбиновой кислотами в процессе концентрирования: 1 – 0, 2 – 5, 3 – 10, 4 – 15 минут

Figure 14. Mini fragments of 1280–1175 cm^{-1} IR spectra of beetroot juice: а) without stabilizer, б) with citric acid, в) with citric and ascorbic acids during concentration: 1 – 0, 2 – 5, 3 – 10, 4 – 15 minutes

Лучше всего об этом говорят мини фрагменты спектров 1280–1175 cm^{-1} на Рисунке 14, иллюстрируя различия в состоянии протеин-углеводной системы трех серий образцов свекольного сока, отмеченные выше (Рисунок 11д), и во всех случаях подчеркивая:

- разницу в оптических свойствах между системой, подвергнутой механическому воздействию (Рисунок 14а) и системами (Рисунок 14б и Рисунок 14в) после суммарного воздействия — кислотного и механического;
- ее качественную стабильность независимо от степени концентрирования образцов;
- роль аскорбиновой кислоты, снижающей реконструктивную эффективность лимонной кислоты;
- разницу в динамике концентрирования, которая достаточно хорошо прослеживается по относительному расположению и интенсивности кривых светопоглощения.

Рисунок 15, представляя фрагменты спектров последних концентратов (15 минут) трех серий образцов свекольного сока после хранения через 1, 2 и 4 месяца, не показал каких-либо существенных изменений в областях проявления характеристичных признаков сахарозы (фрагменты «а, б»), обусловленных колебаниями структурных элементов циклов глюкозы и фруктозы. Но позволил отметить некоторые изменения в положении ее функциональных группировок в дублете 1375/1335 cm^{-1} (фрагменты «в»), формы самого дублета, относительном расположении спектральных кривых в составе полосы 1412 cm^{-1} и смещении ее максимума в положение 1409 cm^{-1} через 4 месяца хранения образцов.

Сопоставляя фрагменты «г» Рисунков 13 и 15 были отмечены изменения как в форме, так и положении максимума основной полосы в спектрах всех образцов в процессе хранения, не наблюдавшиеся при концентрировании. Менее выражено, но аналогичный эффект имел место и на фрагментах «д» Рисунка 15 при сохранении общего контура спектральных кривых.

Данные проявления в изменении оптических свойств концентратов свекольного сока могут объясняться способностью биомолекул к спонтанной самоорганизации и трансформации в процессах структурной и энергетической стабилизации его системы в период хранения после ряда разрушительных механических и химических вмешательств. Причем в зависимости от вещественного состава системы [34,44,45] могут последовательно реализовываться разные естественные механизмы самоорганизации, влияя на динамику процесса ее стабилизации при хранении.

Однако при всех структурных преобразованиях в концентратах свекольного сока при хранении, стабилизирующее влияние введенных кислот хорошо визуализируют электронные спектры красителя на Рисунке 6.

4. Заключение

Комплексное исследование сока от плодов свеклы сорта «Бордо-237» двумя спектральными методами с контролем методами химического анализа позволило отметить:

- стабилизирующий эффект лимонной и смеси лимонной (0,25%) и аскорбиновой (0,25%) кислот на оптические свойства бетанина (535 нм) и систему концентратов свекольного сока в целом. Установлено, что использование смеси аскорбиновой и лимонной кислоты оказывает меньшее влияние на стабильность бетанина при концентрировании и холодильном хранении. Достаточным количеством использования стабилизатора в технологии бетанинодержающих концентратов является содержание 0,5% лимонной кислоты;
- различие в действии стабилизаторов более наглядно проявляется в реструктуризации протеин-фосфолипид-углеводных комплексов, составляющих основу системы свекольного сока. Выявлено, что уже через две недели холодильного хранения образца, стабилизированного лимонной кислотой и концентрированного в течение 15 минут, полоса 215 нм смещалась в вакуумный ультрафиолет. Формировалась интенсивная стабильная полоса с двумя максимумами — 240 и 250 нм и структурированной правой ветвью, в которой просматривались первые признаки проявления протеиновых конструкций. Признаки сахарозы при этом ретушировались образующимися протеиновыми агломератами. Установлено, что на скорость, степень деградации бетанина и трансформацию вещественного состава свекольного сока без стабилизатора при хранении влияет консистенция. Данный фактор является основным и определяется продолжительностью концентрирования. В УФ области при холодильном хранении концентратов отмечено явно выраженное последовательное формирование структурированной полосы 240–270 нм, имеющей протеиновую природу. Это позволило говорить о том, что имеют место спонтанные преобразования протеиновых структур с укрупнением их глобул, характер которых определяется консистенцией концентрата;
- вариabильность оптических свойств концентратов при хранении обусловлена естественными процессами спонтанной самоорганизации всех компонентов для структурной и энергетической стабилизации системы. Отмечено проявление природы кислой среды и консистенции образца, которые предопределяют механизм и скорость спонтанной самоорганизации сопутствующих биомолекул в процессах структурной стабилизации системы при хранении концентратов свекольного сока в течение 4-х месяцев;
- концентрирование на роторном испарителе в течение 15 минут при температуре $60 \pm 0,2$ °C и давлении 72 ± 10 мбар позволяет достичь продолжительности хранения концентратов при $4 \pm 0,5$ °C до 4 месяцев с 5% потерями красящего вещества — бетанина.

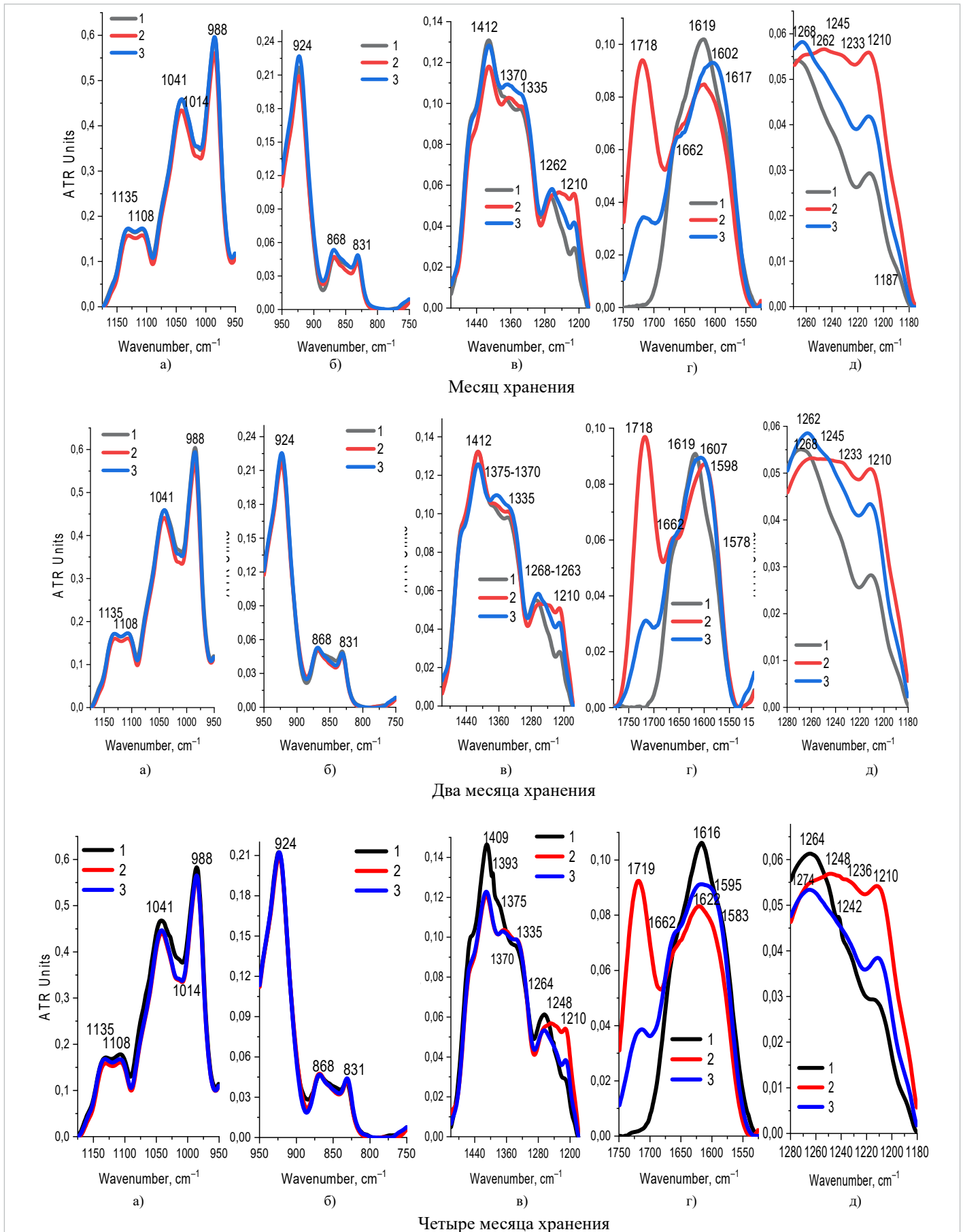


Рисунок 15. Фрагменты ИК-спектров концентратов (15 минут) свекольного сока: 1 – без стабилизатора, 2 – с лимонной кислотой, 3 – с лимонной и аскорбиновой кислотами после 4-х месяцев хранения; а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1750–1500, д) 1280–1180 cm^{-1}

Figure 15. Fragments of the IR spectra of beetroot juice concentrates (15 minutes): 1 – without stabilizer, 2 – with citric acid, 3 – with citric and ascorbic acids after 4 months of storage; а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1750–1500, д) 1280–1180 cm^{-1}

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИ СПИСОК / REFERENCES

- Sangeeta, A., Barman, M., Mishra, P. (2025). Beverages and Concentrates. Chapter in a book: Fruits and Vegetables Technologies: Postharvest Processing and Packaging. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8433-5_9
- Saini, A., Hamid, Shams, R., Dash, K. K., Shaikh, A. M., Kovács, B. (2025). Anthocyanin extraction from black carrot: Health promoting properties and potential applications. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, Article 101533. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101533>
- Li, B., Lee, J.-Y., Luo, Y. (2023). Health benefits of astaxanthin and its encapsulation for improving bioavailability: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, Article 100685. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100685>
- Deshmukh, G. P., Priyanka, Sindhav, R., Jose, N. (2018). Application of beetroot as natural coloring pigment and functional ingredient in dairy and food products. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(12), 2010–2016. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.712.231>
- Saw, P. E., Lee, S., Jon, S. (2019). Naturally occurring bioactive compound-derived nanoparticles for biomedical applications. *Advanced Therapeutics*, 2(5), Article 1800146. <https://doi.org/10.1002/adtp.201800146>
- Küçüköz, K., Venema, K., Chamorro, F., Cassani, L., Donn, P., Prieto, M. A. et al. (2025). Unlocking the potential of fermented beetroot ketchup: Enhancing polyphenol recovery and gut microbiota interactions. *Food Chemistry*, 463 (Part 1), Article 141141. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141141>
- Gengatharan, A., Dykes, G. A., Choo, W. S. (2015). Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. *LWT-Food Science and Technology*, 64(2), 645–649. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.052>
- Huang, D. (2018). Dietary antioxidants and health promotion. *Antioxidants*, 7(1), Article 9. <https://doi.org/10.3390/antiox7010009>
- Sawicki, T., Bączek, N., Wiczkowski, W. (2016). Betalain profile, content and antioxidant capacity of red beetroot dependent on the genotype and root part. *Journal of Functional Foods*, 27, 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.09.004>
- Czylkowska, A., Rogalewicz, B., Szczesio, M., Raducka, A., Gobis, K., Szymański, P. et al. (2022). Antitumor activity against A549 cancer cells of three novel complexes supported by coating with silver nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(6), Article 2980. <https://doi.org/10.3390/ijms23062980>
- Bhat, S. A., Chandramohan, S., Krishna, G. S., Hiranmaya, C., Pajaniradje, S., Nair, A. S. et al. (2024). Betanin-encapsulated starch nanoparticles: Synthesis and cytotoxic effect on colon cancer. *3 Biotech*, 14(10), Article 233. <https://doi.org/10.1007/s13205-024-04078-4>
- Yin, Z., Yang, Y., Guo, T., Veeraraghavan, V. P., Wang, X. (2021). Potential chemotherapeutic effect of betalain against human non-small cell lung cancer through PI3K/Akt/mTOR signaling pathway. *Environmental Toxicology*, 36(6), 1011–1020. <https://doi.org/10.1002/etox.23100>
- Farabegoli, F., Scarpa, E. S., Frati, A., Serafini, G., Papi, A., Spisni, E. et al. (2017). Betalains increase vitexin-2-O-xyloside cytotoxicity in CaCo-2 cancer cells. *Food Chemistry*, 218, 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.112>
- Singh, T., Pandey, V. K., Dash, K. K., Zanwar, S., Singh, R. (2023). Natural bio-colorant and pigments: Sources and applications in food processing. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, Article 100628. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100628>
- Küçüköz, K., Venema, K., Trzaskowska, M. (2024). Beetroot ketchup as a stable carrier of potential probiotic *Lactocaseibacillus rhamnosus* K3 and *Lactobacillus johnsonii* K4: A study on sensory attributes, storage viability, and *in vitro* gastrointestinal survival. *Food and Bioproducts Processing*, 148, 519–526. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.10.004>
- Hadipour, E., Taleghani, A., Tayarani-Najaran, N., Tayarani-Najaran, Z. (2020). Biological effects of red beetroot and betalains: A review. *Phytotherapy Research*, 34(8), 1847–1867. <https://doi.org/10.1002/ptr.6653>
- Madadi, E., Mazloum-Ravasan, S., Yu, J. S., Ha, J. W., Hamishehkar, H., Kim, K. H. (2020). Therapeutic application of betalains: A review. *Plants*, 9(9), Article 1219. <https://doi.org/10.3390/plants9091219>
- Amjadi, S., Abbasi, M. M., Shokouhi, B., Ghorbani, M., Hamishehkar, H. (2019). Enhancement of therapeutic efficacy of betanin for diabetes treatment by liposomal nanocarriers. *Journal of Functional Foods*, 59, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.05.015>
- Di, S., Yu, M., Guan, H., Zhou, Y. (2021). Neuroprotective effect of Betalain against Aβ1-3-induced Alzheimer's disease in Sprague Dawley Rats via putative modulation of oxidative stress and nuclear factor kappa B (NF-κB) signaling pathway. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 137, Article 111369. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.111369>
- Wang, J., Zhang, D., Cao, C., Yao, J. (2020). Betalain exerts a protective effect against glaucoma is majorly through the association of inflammatory cytokines. *AMB Express*, 10(1), Article 125. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-01062-y>
- Azizati-Ruggerio, L., Granados-Balbuena, S. Y., Zainos-Cuapio, Y., Ocaranza-Sánchez, E., Rojas-López, M. (2019). Analysis of the degradation of betanin obtained from beetroot using Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Food Science and Technology*, 56(8), 3677–3686. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03826-2>
- Ahmadi, H., Nayeri, Z., Minuchehr, Z., Sabouni, F., Mohammadi, M. (2020). Betanin purification from red beetroots and evaluation of its anti-oxidant and anti-inflammatory activity on LPS-activated microglial cells. *PLoS One*, 15(5), Article e0233088. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233088>
- Devadiga, D., Ahipa, T. N. (2020). Betanin: A Red-Violet Pigment – Chemistry and Applications. Chapter in a book: Chemistry and Technology of Natural and Synthetic Dyes and Pigments. IntechOpen, 2020.
- Hu, T., Dai, T., He, X., Deng, L., Li, T., Sun, J. et al. (2023). Non-covalent interaction of complex plant protein and betanin: Mechanism of improving thermal stability of betanin. *Food Hydrocolloids*, 138, Article 108456. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108456>
- Racz, C. -P., Racz, L. Z., Floare, C. G., Tomoaia, G., Horovitz, O., Riga, S. (2023). Curcumin and whey protein concentrate binding: Thermodynamic and structural approach. *Food Hydrocolloids*, 139, Article 108547. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108547>
- Janiszewska-Turak, E., Walczak, M., Rybak, K., Pobiega, K., Gniewosz, M., Woźniak, Ł. et al. (2022). Influence of fermentation beetroot juice process on the physico-chemical properties of spray dried powder. *Molecules*, 27(3), Article 1008. <https://doi.org/10.3390/molecules27031008>
- Murugesan, R., Orsat, V. (2012). Spray drying for the production of nutraceutical ingredients – A review. *Food and Bioprocess Technology*, 5(1), 3–14. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0638-z>
- Koshani, R., Jafari, S. M. (2019). Ultrasound-assisted preparation of different nanocarriers loaded with food bioactive ingredients. *Advances in Colloid and Interface Science*, 270, 123–146. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.06.005>
- Martínez-Sánchez, A., Tarazona-Díaz, M. P., García-González, A., Gómez, P. A., Aguayo, E. (2016). Effect of high-pressure homogenization on different matrices of food supplements. *Food Science and Technology International*, 22(8), 708–719. <https://doi.org/10.1177/1082013216642887>
- Nagai, R., Nagai, M., Shimasaki, S., Baynes, J. W., Fujiwara, Y. (2010). Citric acid inhibits development of cataracts, proteinuria and ketosis in streptozotocin (type 1) diabetic rats. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 393(1), 118–122. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2010.01.095>
- Yadikar, N., Ahmet, A., Zhu, J., Bao, X., Yang, X., Han, H. et al. (2022). Exploring the mechanism of citric acid for treating glucose metabolism disorder induced by hyperlipidemia. *Journal of Food Biochemistry*, 46(12), Article e14404. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14404>
- Miyagawa, Y., Fujita, H., Adachi, S. (2021). Kinetic analysis of thermal degradation of betanin at various pH values using deconvolution method. *Food Chemistry*, 361, Article 130165. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130165>
- Trishitman, D., Negi, P. S., Rastogi, N. K. (2021). Concentration of beetroot juice colorant (betalains) by forward osmosis and its comparison with thermal processing. *LWT*, 145, Article 111522. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111522>
- Bazaria, B., Kumar, P. (2016). Compositional changes in functional attributes of vacuum concentrated beetroot juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(6), 1215–1222. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12705>
- Theba, T., Nayi, P., Ravani, A. (2024). Beetroot-based blended juice: Process development, physico-chemical analysis and optimization of novel health drink. *Food Chemistry Advances*, 4, Article 100607. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100607>
- Monono, E. M., Wiesenborn, D. P., Vargas-Ramirez, J. M., Zhou, R. (2019). Preserving juice from industrial beets using organic acids. *Transactions of the ASABE*, 62(1), 177–185. <https://doi.org/10.13031/trans.13051>
- Thippeswamy, B., Joshi, A., Sethi, S., Dahuja, A., Kaur, C., Tomar, B. S. et al. (2022). Chemical additives for preserving the betalain pigment and antioxidant activity of red beetroot. *Sugar Tech*, 24(3), 890–899. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01104-0>
- York, J. L., Roberts, M. P. (1976). The iron and subunit binding sites of hemerythrin. The role of histidine, tyrosine and tryptophan. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Protein Structure*, 420(2), 265–278. [https://doi.org/10.1016/0005-2795\(76\)90318-4](https://doi.org/10.1016/0005-2795(76)90318-4)
- Pawade, S. S., Vilbaste, M., Siiman, A., Toom, L., Herodes, K., Leito, I. (2026). A quantitative approach to determine water and moisture content of different types of lignin using attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy combined with partial least squares regression. *Biofuels, Bioprocesses and Biorefining*, Early View. <https://doi.org/10.1002/bbb.70124>
- Cengiz, M. F., Durak, M. Z. (2019). Rapid detection of sucrose adulteration in honey using Fourier transform infrared spectroscopy. *Spectroscopy Letters*, 52(5), 267–275. <https://doi.org/10.1080/00387010.2019.1615957>
- Wang, J., Kliks, M. M., Jun, S., Jackson, M., Li, Q. X. (2010). Rapid analysis of glucose, fructose, sucrose, and maltose in honeys from different geographic regions using Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Journal of Food Science*, 75(2), C208–C214. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01504.x>
- Barth, A., Zscherp, C. (2002). What vibrations tell about proteins. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 35(4), 369–430. <https://doi.org/10.1017/S0033583502003815>
- Barčot, O., Balarin, M., Gamulin, O., Ježek, D., Romac, P., Brnjac-Kraljević, J. (2007). Investigation of spermatozoa and seminal plasma by Fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 61(3), 309–313. <https://doi.org/10.1366/000370207780220804>
- Zannou, O., Oussou, K. F., Chabi, I. B., Odouaro, O. B. O., Deli, M. G. E. P., Goksen, G. et al. (2024). A comprehensive review of recent development in extraction and encapsulation techniques of betalains. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(30), 11265–11280. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2235695>
- Nemzer, B., Pietrzkowski, Z., Spórna, A., Stalica, P., Thresher, W., Michałowski, T. et al. (2011). Betalainic and nutritional profiles of pigment-enriched red beet root (*Beta vulgaris* L.) dried extracts. *Food Chemistry*, 127(1), 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.081>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Кудинов Роман Евгеньевич — аспирант, факультет биотехнологий, Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А E-mail: k1d.kudinov@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0009-2076-4087 * автор для контактов</p>	<p>Roman E. Kudinov, Postgraduate Student, Faculty Biotechnology, ITMO University Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101 E-mail: k1d.kudinov@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0009-2076-4087 * corresponding author</p>
<p>Кременевская Марианна Игоревна — доктор технических наук, доцент, факультет биотехнологий, Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А E-mail: Marianna.Kremenevskaya@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7021-8772</p>	<p>Marianna I. Kremenevskaya, Doctor of Technical Sciences, Docent, Faculty of Biotechnology, ITMO University Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101 E-mail: Marianna.Kremenevskaya@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7021-8772</p>
<p>Ситникова Вера Евгеньевна — кандидат химических наук, доцент, центр химической инженерии, Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А E-mail: v.e.sitnikova@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4753-976X</p>	<p>Vera E. Sitnikova, Candidate of Chemical Sciences, Docent, Center for Chemical Engineering, ITMO University Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101 E-mail: v.e.sitnikova@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4753-976X</p>
<p>Федоров Александр Валентинович — доктор технических наук, доцент, факультет биотехнологий, Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А E-mail: alval58@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0030-3848</p>	<p>Alexandr V. Fedorov, Doctor of Technical Sciences, Docent, Faculty of Biotechnology, ITMO University Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101 E-mail: alval58@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0030-3848</p>
Критерии авторства	Contribution
<p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.</p>	<p>Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.</p>
Конфликт интересов	Conflict of interest
<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>	<p>The authors declare no conflict of interest.</p>

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-119-128>



Поступила 15.12.2025

Поступила после рецензирования 17.03.2026

Принята в печать 23.03.2026

© Утьянов Д. А., Вострикова Н. Л., Гутнов А. В.,
Захарова В. А., Иванов А. А., Полищук Е. К., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИСФЕНОЛОВ В ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ МЕТОДОМ ГХ–МС

Утьянов Д. А.^{1*}, Вострикова Н. Л.¹, Гутнов А. В.², Захарова В. А.¹, Иванов А. А.¹, Полищук Е. К.¹

¹Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

²Северо-Осетинский государственный университет, Владикавказ, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

Бисфенолы, ГХ–МС, пластификаторы, безопасность, пищевая продукция

В работе разработана и валидирована методика количественного определения шести из семи выбранных бисфенолов в пищевой продукции методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием после силилилирующей дериватизации. Пробоподготовка основана на экстракции аналитов с использованием QuEChERS и последующей очисткой экстрактов ТФЭ и концентрированием перед хроматографическим анализом. Процедура пробоподготовки включает гексановое обезжиривание и дисперсную твердофазную очистку. Дериватизация выполняется с использованием МСТФА при контролируемой температуре для получения стабильных летучих производных, пригодных для ГХ–МС анализа. Получены количественные характеристики метода, включающие пределы обнаружения (LOD) и пределы количественного определения (LOQ) для каждого из исследуемых бисфенолов. Для каждого аналита рассчитана степень экстракции при трёх уровнях внесения, которая составляет не менее 88 %, что подтверждает воспроизводимость и достаточную эффективность выбранной схемы подготовки пробы. Хроматографические условия обеспечивают разделение исследуемых бисфенолов, кроме одной критической пары, и устойчивость удерживаемых сигналов в ходе серийного анализа. Для всех соединений получены характерные масс-спектры и определены ионные переходы, используемые для идентификации. Представленная методика подойдет в большей степени исследователям по изучению факторов, увеличивающих степень миграции бисфенолов в пищевые продукты. В статье приведены все необходимые этапы для исследования пищевой продукции: детальное описание процесса подготовки пробы, протокол дериватизации, инструментальные установки для ГХ–МС системы. Процесс подготовки пробы сделан для сложных пищевых матриц, которые требуют высокой степени очистки для последующего анализа.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследования проводились в рамках государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН FGUS-2024-0002.

Received 15.12.2025

Accepted in revised 17.03.2026

Accepted for publication 23.03.2026

© Utyanov D. A., Vostrikova N. L., Gutnov A. V.,
Zakharova V. A., Ivanov A. A., Polishchuk E. K., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

METHODOLOGICAL APPROACHES TO QUANTIFICATION OF BISPHENOLS IN FOODS BY GC–MS

Dmitry A. Utyanov^{1*}, Natalia L. Vostrikova¹, Andrey V. Gutnov²,
Varvara A. Zakharova¹, Alexey A. Ivanov¹, Ekaterina K. Polishchuk¹

¹V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

²North-Ossetian State University, Vladikavkaz, Russia

KEYWORDS:

bisphenols, GC–MS, plasticizers, safety, foods

ABSTRACT

The paper presents the developed and validated method for quantification of six out of seven selected bisphenols in foods by gas chromatography with mass spectrometric detection after *silylation* derivatization. Sample preparation is based on extraction of analytes using QuEChERS with the following purification of extracts using SPE and concentration before chromatographic analysis. The procedure of sample preparation includes defatting using hexane and dispersive solid phase purification. Derivatization is carried out with the use of MSTFA under controlled temperature to obtain stable volatile derivatives suitable for GC–MS analysis. The quantitative characteristics of the method were obtained that included limits of detection (LOD) and limits of quantification (LOQ) for each of the studied bisphenols. For each analyte, a degree of extraction at three levels of introduction was calculated, being no less than 88 %, which corroborates reproducibility and sufficient performance of the chosen scheme of sample preparation. Chromatographic conditions ensure separation of the studied bisphenols, except one critical pair, and stability of retained signals during serial analysis. For all compounds, characteristic mass spectra were obtained and ion transitions used for identification were determined. The presented method is suitable to a larger extent in research on studying factors that increase a degree of migration of bisphenols into foods. The paper presents all necessary stages for analysis of food products: detailed description of the process of sample preparation, protocol of derivatization, equipment for the GC–MS system. The process of sample preparation is designed for complex food matrices that require a high degree of purification for the following analysis.

ACKNOWLEDGEMENTS: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2024-0002 of the state assignment of the V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of RAS.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Утьянов, Д. А., Вострикова, Н. Л., Гутнов, А. В., Захарова, В. А., Иванов, А. А., Полищук, Е. К. (2026). Методические подходы количественного определения бисфенолов в пищевой продукции методом ГХ–МС. *Пищевые системы*, 9(1), 119–128. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-119-128>

FOR CITATION: Utyanov, D. A., Vostrikova, N. L., Gutnov, A. V., Zakharova, V. A., Ivanov, A. A., Polishchuk, E. K. (2026). Methodological approaches to quantification of bisphenols in foods by GC–MS. *Food Systems*, 9(1), 119–128. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-119-128>

Так же из ВРА (или ВРФ, ВРС) и эпихлоргидрина изготавливают эпоксидные смолы. Бисфенол выступает как одна из ключевых частей двухкомпонентной структуры эпоксидной смолы.

В упаковке эпоксидные смолы используются для:

- внутренних защитных покрытий консервных банок,
- внутренних слоев металлических крышек,
- покрытий для металлических баночек для напитков,
- защитного слоя алюминиевой и стальной упаковки.

Эпоксидные покрытия применяют так как они придают упаковке коррозионную стойкость, барьерную защиту от агрессивной среды изделия, которое хранится, предотвращают контакт металла с продуктом.

Учитывая, что невозможно провести идеальную реакцию, при которой бы все количество бисфенолов было «сшито» в упаковку, часть бисфенолов остается не задействованной в реакции, из-за чего она может мигрировать в продукт. Помимо этого, есть и другие факторы, которые повышают риск миграции бисфенолов, среди которых нагрев, УФ-излучение, высокий pH и пр [5,6,7]. Последние деструктивные факторы вызывают активные процессы распада полимерных материалов, в результате которых из полимерной матрицы высвобождаются свободные бисфенолы.

Риску миграции бисфенолов подвержены абсолютно все виды пищевой продукции, что подтверждается результатами многочисленных исследований на различных модельных средах. В Таблице 1 приведена сводка по миграции ВРА в 4 смоделированные пищевые матрицы: спиртовая (10–50% раствор этанола), жировая (н-гексан или н-гептан), кислотная (3–5% уксусная кислота) и водная (дистиллированная вода).

Как показывают эксперименты, бисфенолы лучше мигрируют в жировые среды, т.е. в жиры и масла (или в продукты с большим содержанием жира). Это связано с их липофильностью. Но несмотря на то, что бисфенолы по своей природе гидрофобны, они все же в некоторых количествах растворяются в воде (например, растворимость бисфенола А в воде доходит до 190 мг/л), поэтому риски миграции бисфенолов в бутылированную воду тоже есть. К тому же большое количество научных работ посвящено контаминации бисфенолами не пищевой продукции, а различного рода водных источников.

Так, например, Lim и др. [10] провели исследования питьевой воды Южной Кореи (водопроводную, очищенную и бутылированную), результаты которых показали, наличие значительных количеств ВРА в водопроводной воде и бисфенола Ф (ВРФ) в очищенной воде. В целом, авторы заявляют, что несмотря на обнаружение бисфенолов в образцах, среднее их потребление для каждой группы населения составляет 0,36–0,72 мг/кг массы тела в день, что, как отмечают авторы, значительно ниже нормы, установленной Европейским агентством по безопасности пищевых продуктов в 4мкг/кг массы тела. Однако важно отметить, что в 2023 году были опубликованы новые исследования, на основании которых допустимая суточная доза ВРА была снижена в 20 000 раз до 0,2 мг/кг [1].

Другая работа в этом направлении [11] была посвящена исследованию поверхностных вод рядом с городом Порт Диксон, Малайзия. Результаты показали, что поверхностные воды содержали концентрации бисфенолов почти до 2000 мг/л. Большая часть пришлась на ВРФ со средней концентрацией ≈1100 мг/л, а вот ВРА и бисфенола S (ВРС) содержалось значительно меньше, ≈ в 20 и в 100 раз соответственно.

И работы доказывающие наличие бисфенолов и их аналогов в природных водных источниках уже не новы. Jin и Zhu в 2016 году впервые установили наличие бисфенолов в водах реки Ляохэ и озера Тайху, Китай [12]. Согласно опубликованным данным, в наибольших количествах были обнаружены ВРА и ВРС. Причем в отличие от [11] в китайских водных ресурсах наибольшая доля приходилась на ВРС.

Zhang и соавторы оценили загрязнение воды бисфенолами на 20 станциях очистки воды [13]. Эксперимент проводили до и по-

сле очистки воды, результаты показали наличие в образцах воды до очистки таких бисфенолов как ВРА, бисфенол АF (ВРАФ), ВРВ, ВРЕ, ВРФ и ВРС с концентрациями до 34,9 мг/л, 10,8 мг/л, 14,3 мг/л, 6,2 мг/л, 12,6 мг/л и 5,2 мг/л. Применяемая технология очистки воды позволила снизить количество бисфенолов в ней, после очистки содержание бисфенолов составило: ВРА до 6,5 мг/л, ВРАФ до 4,7 мг/л, ВРВ до 3,2 мг/л, ВРЕ до 0,6 мг/л, ВРФ до 0,9 мг/л и ВРС до 1,6 мг/л. В целом очистка воды позволяет избавиться от бисфенолов, например, количество ВРА после очистки снизилось более чем в 5 раз, тем не менее она не помогает избавиться от бисфенолов окончательно. Авторы [13] так же рассчитали примерное потребление бисфенолов, оно составило 0,25 мг/кг массы тела в день, что меньше чем в работе [10], но также превышает новую допустимую суточную дозу по [1].

Оценку очистных сооружений сточных вод провели в своей работе Cesen и др. [14]. Согласно опубликованным результатам в сточных водах, до очистки были обнаружены 8 бисфенолов — ВРАФ, бисфенол АР (ВРАР), ВРВ, ВРС, ВРЕ, ВРФ, ВРС и бисфенол Z (ВРZ). Наибольшее количество бисфенолов было обнаружено в центрах очистки воды, куда попадают сточные воды с пищевых предприятий, концентрации бисфенолов в таких водах были в диапазоне от 599 до 3030 мг/л. Большие концентрации бисфенолов были обнаружены и в сточных водах рядом с предприятиями по переработке текстиля. Однако после очистки, количество бисфенолов в воде резко снижалось — из 8 обнаруженных бисфенолов только ВРФ и ВРС были в количествах достаточных для обнаружения по методу определения. Их концентрации составили 36,7 и 40,6 мг/л соответственно. В целом удаление бисфенолов при очистке составило порядка 96,2% [14].

Аналогичную работу провели авторы [15], оценивая концентрации бисфенолов в сточных водах до и после очистки. В этом случае были изучены помимо уже упомянутых аналогов бисфенолов бисфенол G и бисфенол Cl₂. Наибольшая концентрация до очистки была у ВРА — до 400 мг/л, после очистки она составляла 100 мг/л, т.е. степень удаления ВРА составила порядка 75%, что значительно меньше, чем в работах [13,14]. В целом по результатам работы степень удаления бисфенолов в очистных сооружениях составила от примерно 7 до 88%.

Работ, посвященных исследованию загрязнения окружающей среды бисфенолами с каждым годом становится все больше и больше. Причем география этих работ самая разнообразная, но большая их часть в последнее время публикуется китайскими учеными. Аналогично работе [12] Guan и соавторы [16] исследовали поверхностные воды, воды залива Бейбу Южно-Китайского моря. В [17] исследовали воду и донные отложения реки Чинг Хвай, отобранные в пяти различных местах реки. Все эти работы показывают серьезную проблему загрязнения окружающей среды бисфенолами. В целом содержание бисфенолов природных источниках воды находится на уровне десятки-сотни мг/л. Несмотря на то, что при таких концентрациях бисфенолов в воде ориентировочные количества потребления бисфенолов могут быть значительно меньше допустимых норм, не стоит забывать, что загрязненная вода — это лишь один из потенциальных источников бисфенолов. Поэтому при контроле содержания бисфенолов особенно важно подходить к этому вопросу комплексно. Одним из наиболее важных источников, подлежащих контролю на содержание бисфенолов, должна быть пищевая продукция, т.к. концентрации бисфенолов в пищевой продукции гораздо выше их концентраций в воде из природных источников.

Для контроля содержания бисфенолов в пищевой продукции необходимо разработать методику их определения с учетом пищевых матриц. Сегодня наиболее распространенный метод, используемый в целях определения количества бисфенолов в пищевой продукции — ВЭЖХ–МС/МС. Этот метод широко используется для этих целей, т.к. позволяет определять крайне низкие количества. ГХ–МС метод применяют намного реже для этих целей, т.к. чувствительность его хуже, чем у ВЭЖХ–МС/МС и есть сложности в подготовке проб.

Таблица 1. Миграция ВРА

Table 1. Migration of BPA

Упаковочный материал/тара	Матрица	Условия	Диапазон значений	Источник
Поликарбонат	Водная среда	Комнатная температура	До 83,7 мкг/л	[8]
Поликарбонат	Спиртовая среда	Нагрев до 70 °С	До 54,3 мкг/л	[8]
Поликарбонат	Жировая среда	Комнатная температура	До 142 мкг/л	[8]
Поликарбонат	Кислотная среда	Комнатная температура	До 40,9 мкг/л	[8]
Алюминиевая тара	Кислотная среда	Продолжительный нагрев	До 47 мкг/л	[8]
Бутылки	Спиртовая среда	Продолжительный нагрев	До 6 мкг/л	[9]
Спортивные бутылки	Спиртовая среда, кислотная среда	Комнатная температура	До 0,2 мкг/л	[9]

Для определения бисфенолов даже применяют ВЭЖХ с флуоресцентным детектором (ФЛД) [18] — метод, который может быть даже чувствительнее, чем ВЭЖХ–МС/МС, но, к сожалению, не является в такой же степени селективным.

Описанные ранее работы в большинстве своем были выполнены с использованием ВЭЖХ–МС/МС кроме работы [15], в которой использовали ГХ–МС метод. Пределы качественного определения в этих работах находятся на уровне десятков и сотен нг/л, но в работе [16] авторам удалось достичь невероятных 0,02–0,36 нг/л для воды и 0,01–0,12 для водных отложений, что в 10 раз чувствительнее ГХ–МС методики из [19] и до 1000 раз чувствительнее по некоторым бисфенолам также ГХ–МС методики из [15] равно как и с методикой с ФЛД [18]. Такие пределы обнаружения возможны не только из-за наличия высокоточного оборудования, но и из-за способа подготовки проб и самих проб, которые исследуют. Твердофазная экстракция (ТФЭ) позволяет сильно очистить пробу, что значительно повышает чувствительность прибора. И вода сама по себе проба довольно чистая, для ее анализа не требуется многостадийная и сложная подготовка проб, чтоб избавиться от всех компонентов, которые в ней есть, в отличие от пищевой продукции. Пищевая продукция содержит в своем составе большое количество биомолекул (белки, углеводы) и крупных органических молекул (липиды), не говоря уже о витаминах, органических кислотах, свободных аминокислотах и т.п. Все эти компоненты будут в сильной степени мешать определению конкретных аналитов, если от них не избавиться в должной степени в процессе подготовки пробы. Соответственно, методики определения бисфенолов в пищевой продукции (особенно для многокомпонентных продуктов, которые отличаются высоким содержанием жира или белка, а не напитки) будут в значительной степени менее чувствительнее методик для воды. В доказательство этому можно привести статью Ни и соавторов [20], в которой были исследованы зеленый и черный чай разных провинций Китая. Несмотря на то, что чай не содержит в своем составе значительных количеств белков и жиров, чай богатых различного рода полифенолами, алкалоидами и органическими кислотами. Фенольные соединения, входящие в состав чаев — тоже важная проблема для решения в процессе подготовки пробы, т.к. фенольные соединения и бисфенолы очень похожи по своим химическим свойствам, соответственно тяжело избавиться от фенолов, при этом не теряя бисфенолов, которые необходимо определить. Согласно [20] пределы качественного обнаружения бисфенолов были на уровне 0,02–0,17 мкг/кг, что выше самой чувствительной из описанных ранее методик [15] в 500–1000 раз. Примерно такие же пределы обнаружения установлены и для молочной продукции в работе Cheng и др. [21]. Но помимо результатов авторы [21] приводят в своей статье статистику о влиянии молочной матрицы на сигнал BPF, BPA, BPB, BPS, BPC, BPZ. Согласно результатам, подавление сигнала от матрицы пробы может достигать почти 70% для BPS, который авторы отмечают, как единственный значимый. Матричный эффект для других бисфенолов был в диапазоне от 6 до 19%, что авторы отмечают, как незначимый. Что касается продукции животного происхождения, то пределы качественного обнаружения, несмотря на высокую чувствительность ВЭЖХ–МС/МС метода, для некоторых бисфенолов и их метаболитов в целом несильно будут отличаться от пределов многих аналитов, которые определяют таким методом (антибиотики, гормоны и т.п.) и находятся на уровнях 0,1–0,5 мкг/кг [22].

Учитывая то, что бисфенолы в пищевых продуктах находятся обычно в следовых концентрациях, если не было влияния факторов, которые усиливают их миграцию (например, нагрев), ВЭЖХ–МС/МС несомненно является более предпочтительным методом для контроля содержания бисфенолов в пищевой продукции. Но оборудование для такого анализа сегодня стоит чересчур дорого, и не каждая лаборатория может себе позволить трехквadrupольный масс-спектрометр. Сегодня цены на ВЭЖХ–МС/МС систему начинаются от 70 миллионов рублей, а разработка отечественного аналога была завершена в этом году. Только в 2026 году его планируется внести в реестр средств измерений, поэтому серийное производство стоит ожидать не ранее конца 2026 — начала 2027 года. В то время как ГХ–МС стоит значительно меньше, сегодня в России есть отечественные аналоги, которые по своим характеристикам не уступают зарубежному оборудованию, а приобрести его вполне можно до 7–10 млн рублей. Как показал приведенный обзор, методом ГХ–МС возможно добиться чувствительности несильно уступающей чувствительности ВЭЖХ–МС/МС, в связи с чем целью настоящей работы была разработка методики количественного определения бисфенолов в пищевой продукции методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием.

2. Объекты и методы

Для постановки методики определения бисфенолов в пищевой продукции использовали стандартные образцы бисфенола А (BPA) — 2,2-бис(4-гидроксифенил)пропана $\geq 99\%$ (TCI Chemicals, Япония), бисфенола В (BPB) — 2,2-бис(4-гидроксифенил)бутана $\geq 98\%$ (TCI Chemicals, Япония), бисфенола С (BPC) — 2,2-бис(4-гидрокси-3-метилфенил)пропана $\geq 98\%$ (TCI Chemicals, Япония), бисфенола Е (BPE) — 4,4-этилендидибисфенола $\geq 98\%$ (TCI Chemicals, Япония), бисфенола F (BPF) — 4,4-дигидроксидифенилметана $\geq 99\%$ (TCI Chemicals, Япония), бисфенола S (BPS) — бис(4-гидроксифенил)сульфона $\geq 98\%$ (TCI Chemicals, Япония), и бисфенола AP (BPAP) — 4,4-(α -метилбензилиден)бисфенола $\geq 98\%$ (TCI Chemicals, Япония).

Для дериватизации стандартов использовали N-Метил-N-(триметилсилил)трифторацетамид — МСТФА $\geq 98,5\%$ (Фармсинтэк, Россия), пиридин х.ч. (ЛенРеактив, Россия), гексан х.ч. (ЛенРеактив, Россия), сушильный шкаф ШС 80–01 (Смоленское СКТБ СПУ, Россия).

Хроматографические условия подбирали на газовом хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.2 с масс-спектрометрическим детектором (Хроматэк, Россия) с установленной библиотекой масс-спектров NIST версии 2020 года. Колонка HP-5MS 30 м \times 0,25 мм \times 0,25 мкм.

Для подготовки проб использовали безводный сульфат магния х.ч. (ЛенРеактив, Россия), хлорид натрия х.ч. (ЛенРеактив, Россия), ацетонитрил ч.д.а. (ЛенРеактив, Россия), этилацетат х.ч. (ЛенРеактив, Россия), картриджи ТФЭ Chromabond SiOH (Macherey-Nagel, Германия), вортекс лабораторный L-VM-MINI (Labgic, Китай), центрифуга NF800 (Nuve, Турция), испарительный концентратор в токе азота с водяной баней WT-12 (Miulab, Китай).

Результаты и обсуждение

3.1. Дериватизация

К сожалению, определение бисфенолов с использованием газовой хроматографии невозможно в низких концентрациях без дериватизации. Бисфенолы характерны наличием функциональных гидроксильных групп (–ОН) у фенолов, замещающая водород в которых и можно придать молекуле свойства необходимые для определения их ГХ методом — термостабильность и летучесть. Одним из наиболее распространенных способов дериватизации сегодня является силилирование МСТФА или БСТФА. Высокая термическая и гидролитическая прочность связи Si–O в полученных дериватах является гарантом их стабильности при манипуляции с пробами, особенно при высоких температурах в ГХ колонках. Бисфенолы также хорошо дериватизируются ацетилизацией с искусственным ангидридом [15,20]. В результате реакции водород в гидроксильных группах замещается триметилсилильной группой Si(CH₃)₃ (TMS). Учитывая, что в бисфенолах две –ОН группы, соответственно, замещение будет происходить по двум атомам водорода, в связи с этим в ходе дериватизации с МСТФА будут образовываться 1TMS и 2TMS дериваты бисфенола. Чем дольше происходит процесс дериватизации, тем в большем количестве бисфенолов замещаются оба водорода, однако чересчур высокая температура или продолжительность могут привести к разрушению аналитов. В ходе выполнения настоящей работы подбирались оптимальные продолжительность и температура дериватизации семи бисфенолов.

Для дериватизации в хроматографическую вialу объемом 2 мл вносили по 1,0 \pm 0,1 мг индивидуального бисфенола. К бисфенолам приливали 0,1 мл пиридина и 0,05 мл МСТФА. Вialу плотно закрывали и помещали в предварительно разогретый до 60 °C сушильный шкаф на 30 минут. По истечении времени вialу доставали из шкафа и давали остыть до комнатной температуры, после чего растворяли в 100 мл гексана. Из этого раствора 1 мг/100 мл готовили градуировочные растворы путем прямого или последовательного разведения.

Градуировку строили в диапазоне 1–100 мкг/100 мл. Использовались растворы \approx 10,0, 25,0 50,0, 75,0 и 100,0 мкг/100 мл. В указанном диапазоне калибровка линейность градуировочной кривой R² составила: для BPF 0,99, для BPE 0,98, для BPA 0,98, для BPC 0,9848, для BPB 0,96 и для BPAP 0,97.

В ходе выполнения работы дериватизацию проводили при 50, 60, 70, 80, 90 °C. Температура 60 °C была выбрана как наиболее оптимальная. Оптимальное же время дериватизации для 6 бисфенолов составляет 30–60 минут. На Рисунках 3–8 представлено соотношение 1TMS и 2TMS дериватов для каждого исследованного бисфенола (кроме BPAP) дериватизированного при 60 °C в течение 5–120 минут. Тип деривата определяли по спектру из библиотеки масс-спектров NIST (NIST MS Search Version 2.4, build Mar 25 2020). Для расчета за 100% принимали среднее арифметическое площадей пиков 2TMS

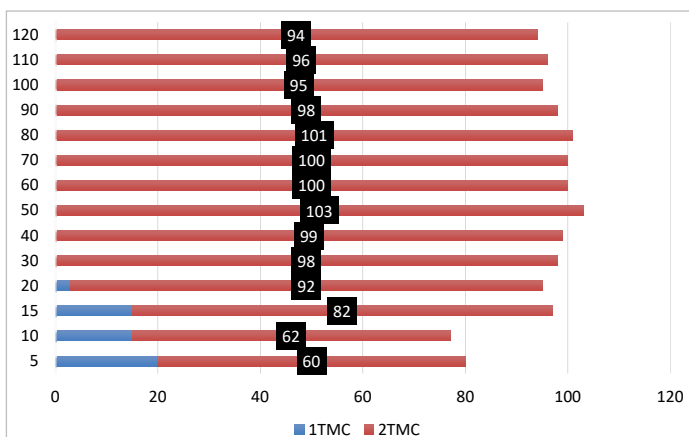


Рисунок 3. Степень дериватизации ВРА с течением времени
Figure 3. Degree of BPA derivatization over time

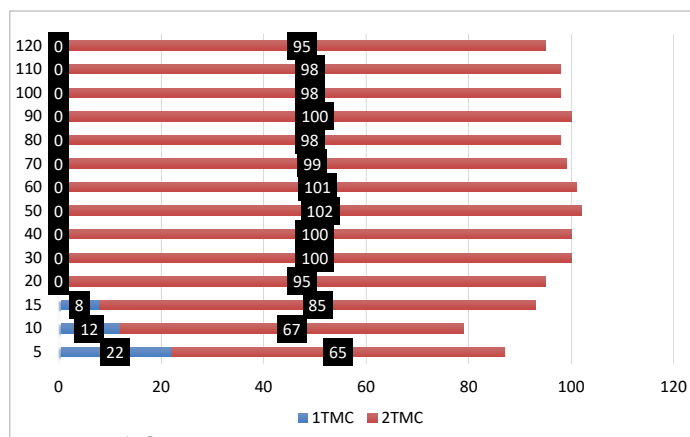


Рисунок 4. Степень дериватизации ВРВ с течением времени
Figure 4. Degree of BPB derivatization over time

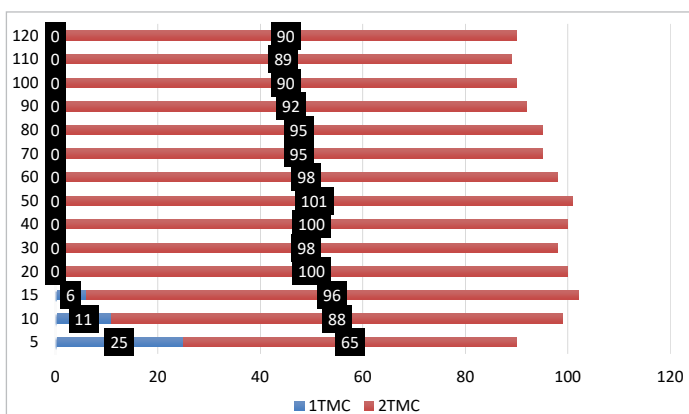


Рисунок 5. Степень дериватизации ВРС с течением времени
Figure 5. Degree of BPC derivatization over time

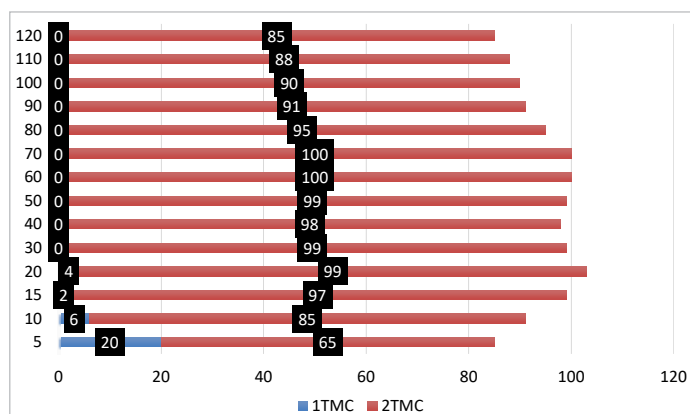


Рисунок 6. Степень дериватизации ВРЕ с течением времени
Figure 6. Degree of BPE derivatization over time

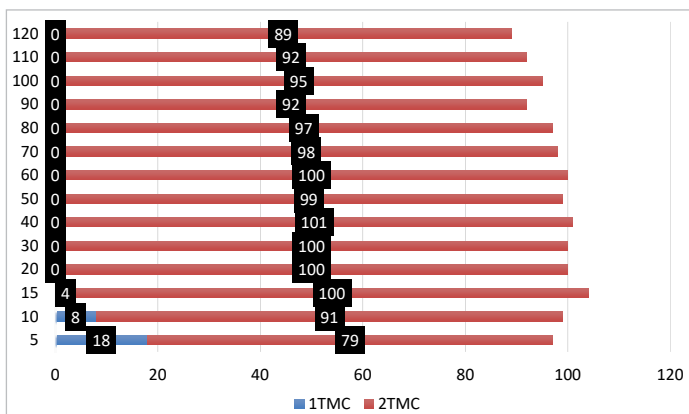


Рисунок 7. Степень дериватизации ВРФ с течением времени
Figure 7. Degree of BPF derivatization over time

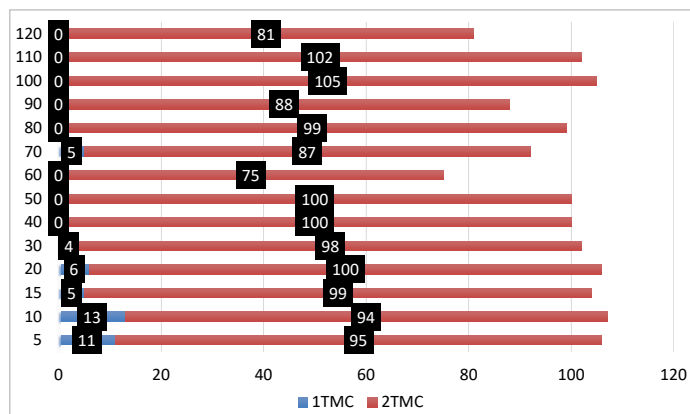


Рисунок 8. Степень дериватизации ВРС с течением времени
Figure 8. Degree of BPS derivatization over time

дериватов бисфенолов полученных после дериватизации в течение 30, 40 и 50 минут. Для других точек процентное содержание дериватов рассчитывали по формуле:

$$C = S_{\text{деривата}} / S_{\text{ср}} \times 100. \quad (1)$$

Из полученных результатов можно установить следующие закономерности:

1. Дериватизация ВРА и ВРВ происходит примерно одинаково. До 20 минуты дериватируется еще не все количество бисфенолов, отмечается большое наличие 1ТМС деривата, которое постепенно снижается к 20 минуте. По истечении 30 минут, 1ТМС дериват больше не детектируется, начиная с 30 минуты, количество 2ТМС деривата выходит на плато и находится примерно на одном уровне до 80–90 минут. После 90 минут дериватизации отмечается небольшое, но все же снижение количество 2-ТМС деривата относительно среднего значения трех точек 30, 40 и 50 минут. Однако снижение составляет всего 2–5 процентных пункта, что скорее может говорить о систематической погрешности использованных СИ, чем о разрушении дериватов.

2. Схожий процесс дериватизации отмечается и у ВРС, ВРЕ и ВРФ. У этих бисфенолов дериватизация проходит схоже с ВРА и ВРВ до 60 минут — сначала отмечается неполная дериватизация аналита, обнаруживаются пики 1ТМС дериватов, к 30 минуте количество выходит на плато. А вот начиная с 60 минуты отмечается уже более явное снижение количества 2ТМС дериватов, что говорит о том, что 2ТМС дериваты этих трех бисфенолов уже понемногу начинают разрушаться при более длительном температурном воздействии.

3. Дериватизация ВРС выглядит непохожей ни на один из других бисфенолов. У ВРС так же отмечаются некоторые количества 1ТМС деривата, которое падает к 30 минуте, но в целом суммарное количество 1ТМС и 2ТМС дериватов до 30 минуты составляет больше, чем на отрезке времени 30–50 минут. После 50 минуты также нет никакой закономерности, количество 2ТМС деривата то резко увеличивается, то резко уменьшается. Вероятно, это связано с тем, что подобранные условия дериватизации, подходящие для 5 других бисфенолов, не подходят для ВРС, либо подобранные хроматографические условия не подходят для 2ТМС деривата ВРС.

Схожую картину по дериватизации приводят Lucarini с соавторами [23]. Большинство бисфенолов даёт устойчивые 2-TMS-производные, а повышение температуры дериватизации снижает полноту реакции и вызывает деструкцию фенольных производных. Нестабильность сильнее выражена у сульфат-замещённых аналогов, что полностью совпадает с нашими результатами по BPS [23]. Полученные данные в вопросе выбора температуры дериватизации также совпадают с обзорной работой [24], где сказано, что МСТФА оптимально работает при 40–60 °С; выше 70 °С начинается деградация TMS-эфиров и обратное отщепление. Данные по BPS совпадают и с работой [25], где отмечено, что для BPS и других сильно полярных аналогов бисфенолов силилирование даёт нестабильные продукты. Также приведенный нами протокол дериватизации совпадает с описанием способов дериватизации по [26], где сказано, что при избытке реагента и/или слишком длительном нагревании возможно образование и 3TMS дериватов из-за вторичного силилирования боковых групп.

Одним из возможных объяснений нестабильности BPS и его производных в процессе дериватизации может быть его высокая фоточувствительность характерная для ароматических сульфонов. В частности, в работе [27] было обнаружено, что фотодеградация BPS происходит значительно быстрее, чем в случае ВРА. Фотодеградация идет по радикальному пути с высвобождением пара-гидроксibenзолсульфокислоты, и высокий уровень pH дериватизационной среды, где пиридин действует как основание, может только способствовать этому разложению.

3.2. Хроматографические условия

Полученные дериваты бисфенолов определяли с использованием следующих настроек ГХ–МС системы:

Температура испарителя: 250 °С.

Колонка: HP-5MS.

Газ-носитель: гелий.

Скорость потока: 0,6 мл/мин.

Температурный градиент термостата колонки: Начальная температура 100 °С, выдержка 2 минуты, подъем температуры со скоростью 10 °С в минуту до 300 °С, выдержка 8 минут, общее время анализа 30 минут.

Температура источника ионов: 230 °С.

Температура переходной линии: 300 °С.

Сканирование в диапазоне масс 33–550.

Задержка выхода растворителя: 5 минут.

Описанные приборные установки позволяют получить хроматограмму 2TMS дериватов стандартной смеси 6 бисфенолов, приведенную на Рисунке 9. Хроматограмма приведена для концентраций ≈10мкг/100мл в диапазоне времени с 16 по 21 минуту.

Пик деривата BPS отсутствует на хроматограмме, т.к. после изучения способа дериватизации было принято решение не продолжать разработку методики для BPS. На это решение повлияло, во-первых, неоднозначные результаты по изучению дериватизации. Во-вторых, у деривата BPS при одинаковых концентрациях с ВРА, ВРВ, ВРЕ, ВРФ интенсивность сигнала была в 70–100 раз меньше, чем у других бисфенолов.

Причин такому отличию для BPS может быть несколько. Первая — наличие в составе молекулы сульфонильной группы –SO₂–. Сульфонильная группа — сильнополярная группа, которая не позволяет сделать молекулу бисфенола Эс в достаточной степени неполярной при реакции с МСТФА, чтобы полученный дериват хорошо растворялся в неполярном гексане после дериватизации. Помимо этого, сульфонильная группа очень термостабильная, из-за чего дериват BPS может хуже испаряться в испарителе газового хроматографа, соответственно, гораздо меньшее его количество попадет и на детектор. Учитывая, что в результате проведенных исследований был получен пик, масс-спектр которого совпадает с масс-спектром 2TMS деривата бисфенола S, разработанная методика определения бисфенолов позволит качественно определять BPS в пищевой продукции, но концентрации в продукте при этом должны быть очень высокими, что может быть не очень применимо и необходимо на практике, т.к. BPS из-за своей полярности и «стабильности» в самом упаковочном материале хуже всех других бисфенолов мигрирует в пищевую продукцию, особенно с высоким содержанием жира.

Как видно из хроматограммы приведенные приборные установки позволяют добиться отличного разделения 4 из 6 пиков. Коэффициенты базового разрешения R_s для ВРФ–ВРЕ ($R_s=3,8$), ВРЕ–ВРА ($R_s=5,7$), ВРА–ВРС ($R_s=12,1$), ВРВ–ВРАП > 1,5. R_s пары ВРС–ВРВ=0,58. При разработке методик для количественного определения нужно добиваться хроматографического разделения с R_s более 1,0. Учитывая, что настоящая методика разрабатывается для определения бисфенолов, то данным правилом можно пренебречь, т.к. при производстве полимерного материала используют только один бисфенол, соответственно, вероятность того, что в продукт мигрирует два бисфенола (тем более именно С и В, чтобы помешать достоверному количественному определению одного из них) довольно мала. К тому же есть отличия в масс-спектрах ВРВ и ВРС — наиболее интенсивные ионы были 357 m/z и 385 m/z соответственно, что дополнительно поможет в идентификации бисфенола.

Полученные масс-спектры бисфенолов полностью совпадали с масс-спектрами бисфенолов по библиотеке NIST. Не удалось сравнить только полученный масс-спектр ВРАП (Рисунок 10) с библиотечным, т.к. в библиотеке он не приведен. Но в целом наиболее интенсивный ион для бисфенола можно рассчитать по формуле:

$$M^+ = M + 2 \times TMS - 2 - CH_3 - e, \tag{2}$$

где: M — молекулярная масса бисфенола а.е.м.; TMS — триметилсилильная группа массой 73 а.е.м.; CH₃ — метильный радикал массой 15 а.е.м.

В молекуле бисфенола 2 атома водорода заменяются двумя TMS группами за счет чего ее масса уменьшается на 2 и увеличивается на 146. В результате ионизации и последующей фрагментации отщепляется метильный радикал, в связи с чем самый интенсивный ион получается меньше на 15 а.е.м., чем ион триметилсилильного деривата бисфенола. Исключение составляют ВРВ, у которого самый интенсивный ион, как и у ВРА, 357m/z, ввиду отщепления у него при фрагментации не метильного, а этильного радикала, и ВРФ,

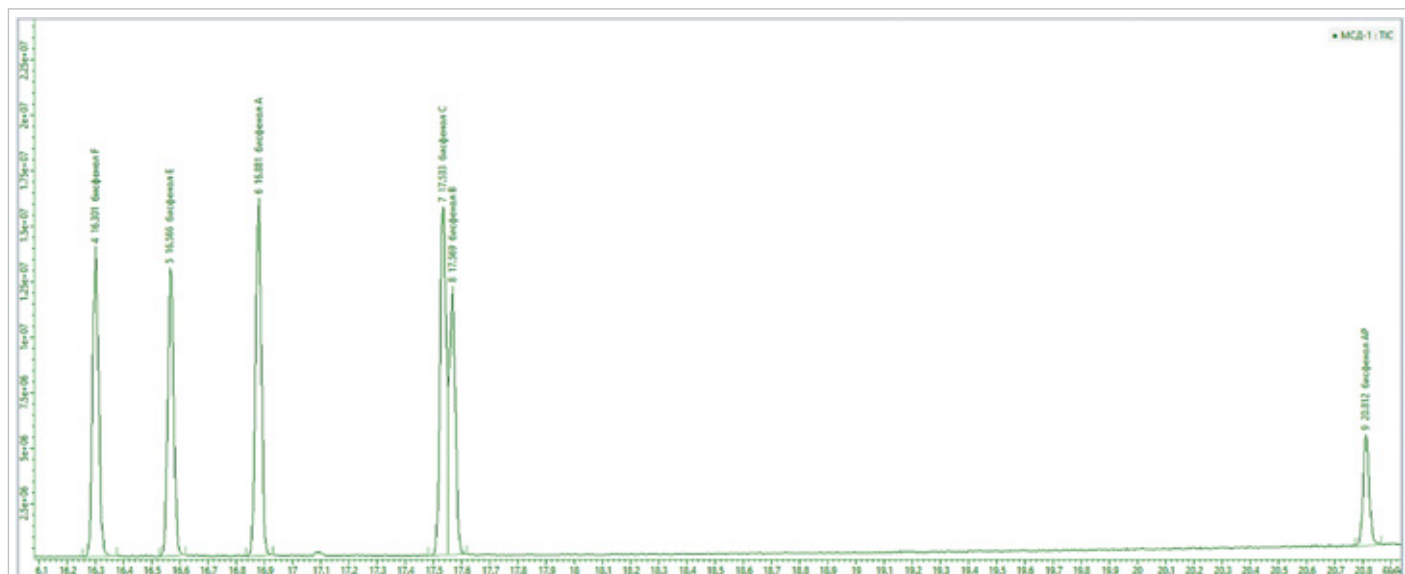


Рисунок 9. Хроматограмма смеси 2TMS дериватов смеси стандартных образцов бисфенолов
Figure 9. Chromatogram of the mixture of 2TMS derivatives of the mixture of the bisphenol standard samples

у которого самый интенсивный ион 344m/z, т.е. отщепление никакого радикала не происходит, m/z иона совпадает с массой нефрагментированной молекулы 2ТМС-ВРФ. Картина с ВРФ может служить подтверждением того, что при фрагментации от деривата бисфенола отщепляется метильный (или этильный как у ВРВ) радикал именно от самого бисфенола, а не от ТМС групп.

Согласно полученному масс-спектру (Рисунок 10) — самый интенсивный ион 419 m/z. Подтверждением того, что это именно бисфенол АП служит следующий расчет по приведенной ранее формуле:

$$290 + 146 - 2 - 15 = 419.$$

Но в целом, интенсивность сигнала деривата ВРАР гораздо ниже дериватов других бисфенолов (Рисунок 7). Площади пиков деривата ВРАР были меньше площадей пиков дериватов других бисфенолов (кроме ВРС) примерно в 3–5 раз. Из-за этого пределы количественного и качественного обнаружения будут значительно хуже, чем у других бисфенолов. Слабый сигнал деривата ВРАР может быть связан с тем, что в ВРАР две фенольные группы соединены между собой не пропаном, как, например, ВРА, а фенилэтаном. Из-за этого молекула ВРАР значительно тяжелее молекул большинства бисфенолов, соответственно она менее летуча, даже при получении силильных дериватов. Тем не менее уровень сигнала ВРАР, который был значительно выше сигнала ВРС, свидетельствует о том, что его можно определять методом ГХ–МС, но в гораздо больших концентрациях, чем другие бисфенолы. Тем не менее если будет стоять задача определения именно ВРАР ГХ–МС методом в низких концентрациях, то можно доработать протокол дериватизации, например, увеличить продолжительность дериватизации или температуру, инструментальный метод, например, увеличить температуру испарителя. Однако эти изменения вероятнее всего приведут к невозможности определения других бисфенолов, т.к. они могут разрушиться из-за воздействия более высоких температур.

В Таблице 2 приведены m/z наиболее интенсивных ионов, которые рекомендуется использовать при градуировке хроматографа, для 6 дериватов бисфенолов.

Таблица 2. Наиболее интенсивные ионы масс-спектров, определяемых аналитов

Table 2. The most intensive ions of mass-spectra of the analytes under study

Аналит	Молекулярная масса, а.е.м.	Ион 1, m/z	Ион 2, m/z
2ТМС-ВРА	372	357	73
2ТМС-ВРВ	386	357	73
2ТМС-ВРС	399	385	73
2ТМС-ВРЕ	357	343	73
2ТМС-ВРФ	344	344	73
2ТМС-ВРАР	434	419	73

Данные приведены на основании полученных масс-спектров и масс спектров, приведенных в библиотеке NIST. Анализ данных Таблицы 2 показывает, что, наиболее интенсивный ион всегда (кроме ВРВ и ВРФ) будет обладать m/z меньше на 15 молекулярной массы 2ТМС-деривата, а второй самый интенсивный ион — 73 m/z, что соответствует триметилсилильной группе.

3.3. Подготовка пробы

Для подготовки пробы пищевой продукции в целях определения количественного содержания бисфенолов описываемым методом, как уже было отмечено ранее, нужно в максимальной степени избавиться от компонентов, составляющих пищевой продукт, основные из которых это жиры, белки и углеводы.

Первый этап — высаливание и обезжиривание пробы. Для этого продукт массой ≈10 г переносят в центрифужную пробирку и при-

ливают 20 мл ацетонитрила, пробирку следует встряхнуть в течение 1–2 минут на лабораторном вортексе. Затем в пробирку вносят 4 г сульфата магния, 1 г хлорида натрия, 1 г натрия цитрата и 0,5–1 г натрия гидрогенцитрата. Можно использовать уже готовые смеси в QuEChERS наборах разных производителей можно использовать другие соли, которые будут выполнять такой же функционал, как описанные. Сульфат магния добавляется для связывания свободной воды в пробе. Хлорид натрия добавляется для высаливания, что дополняет действия сульфата магния. При подготовке проб на бисфенолы очень важно избавиться от как можно большего количества воды, т.к. в присутствии воды дериват — МСТФА — может быть не так эффективен. Цитрат натрия и гидрогенцитрат натрия добавляются для поддержания pH, чтобы избежать образования сильнокислой или щелочной среды из-за выделяющихся из продукта составляющих, т.к. в таких средах бисфенолы могут разрушаться или изомеризоваться. После внесения солей пробирку встряхивают на лабораторном вортексе в течение 1–2 минут.

Следующий этап обезжиривание. После перемешивания пробирки на вортексе в нее приливают 15 мл гексана. Пробирку еще раз тщательно перемешивают на вортексе после чего центрифугируют в течение 5 минут при минимум 4000 об/мин. После центрифугирования гексановый слой удаляют.

Следующий этап очистка от органических кислот, сахаров, липидов, стероидов и пр. способом дисперсной ТФЭ или ТФЭ с картриджами. Для этого в центрифужную пробирку предварительно вносят первично-вторичный аминный сорбент (PSA — primary secondary amine), октадецилсилан (С18ЕС) и сульфат магния. PSA используется для удаления органических кислот, С18ЕС очищает пробу от липидов, восков, стероидов, жирорастворимых веществ, сульфат магния для дополнительного обезжиривания. Для дисперсной ТФЭ рекомендуется использовать уже готовую смесь для QuChERS экстракции (например, Dispersive SPE 15ml, Fatty samples от Agilent Technologies, США). Но важно понимать, что PSA и С18ЕС могут сорбировать и некоторое количество бисфенолов. Использование ацетонитрила сводит к минимуму вероятность сорбирования бисфенолов на С18ЕС. PSA же может сорбировать значительно большее количество бисфенолов, поэтому рекомендуется добавлять его в количестве не более 50 мг на 1 мл ацетонитрильного экстракта. Для подготовки проб для определения бисфенолов допускается также использовать смесь без PSA или в ацетонитрильный экстракт после обезжиривания гексаном внести 1мл метанола или изопропанола, это снижает сорбцию бисфенолов на PSA. Собственно, в пробирку со смесью для дисперсной ТФЭ вносится ацетонитрильный экстракт после этапа обезжиривания. Пробирка тщательно перемешивается на лабораторном вортексе и центрифугируется в течение 5 минут при минимум 4000 об/мин. После центрифугирования ацетонитрил переносят в колбу и упаривают на лабораторном концентрате в токе азота при температуре не выше 40 °С до минимального объема (≈ 50–100 мкл), не допуская полного высушивания остатка. Получившийся после выпаривания объем используют для дериватизации. Дисперсную ТФЭ рекомендуется использовать для маложирных и богатых полярными соединениями матриц (фрукты, овощи, зерно).

Очистка с картриджами для ТФЭ. Выпаривают ацетонитрил после обезжиривания пробы гексаном также в токе азота без сильного нагревания до объема ≈ 0,05 мл, остаток перерастворяют в 2 мл смеси гексан: этилацетат 9:1. Для ТФЭ используют картридж, наполненный 500 мг силикагеля (в данной работе использовались картриджи Chromabond SiOH). Картридж для ТФЭ предварительно кондиционируется 5–10 мл гексана. После кондиционирования на картридж наносится проба. Далее проба на картридже промывается 10–15 мл чистого гексана, после чего смесью гексан: этилацетат (85:15). Бисфенолы элюируются с картриджа 10–15 мл смеси гексан: ацетон (1:1) или ацетон: этилацетат (1:1). Элюат упаривают в токе азота при

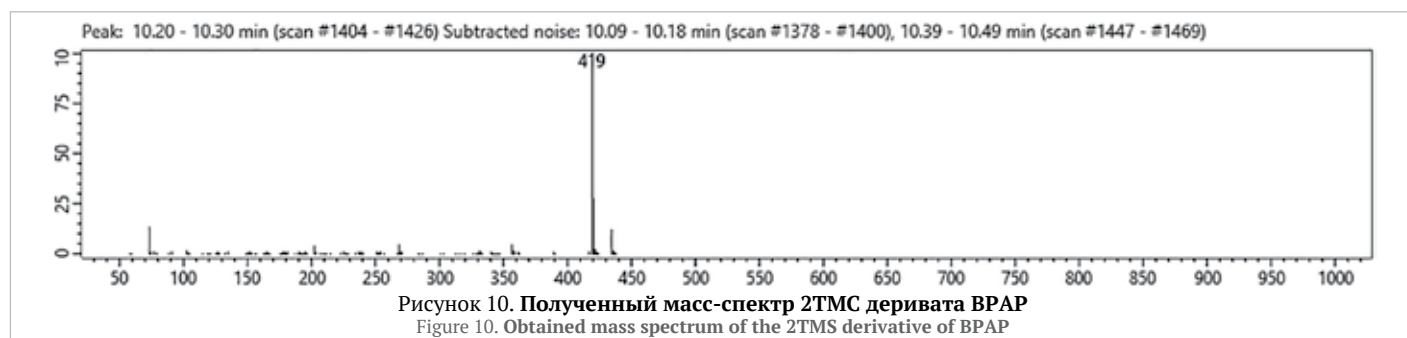


Рисунок 10. Полученный масс-спектр 2ТМС деривата ВРАР
Figure 10. Obtained mass spectrum of the 2TMS derivative of BPAP

температуре не выше 40 °С до минимального объема (≈ 50–100 мкл), не допуская полного высушивания остатка. К полученному остатку приливают 0,1 мл пиридина и 0,05 мл МСТФА, закрывают плотно крышечкой и проводят дериватизацию в соответствии с условиями, описанными выше. После дериватизации пробирку охлаждают до комнатной температуры, осторожно выпаривают излишки реагентов в токе азота при 40 °С до объема ~ 20–50 мкл и доводят объем гексаном до 150–200 мкл. Если возможности выпарить нет, то объем пиридина в вialsе после дериватизации доводят гексаном до 1 мл. Однако частые заколы пиридина в высоких концентрациях может навредить хроматографической системе — как колонке, так и детектору, поэтому пользоваться таким способом крайне не рекомендуется. Данную вialу используют для ГХ–МС анализа. Очистку на картриджах с силикагелем предпочтительно применять для более сложных или потенциально жирных матриц (мясные продукты, рыба, масла), где требуется более тщательное удаление неполярных компонентов.

Для получения еще более чистой пробы, можно выполнить этапы дисперсионной ТФЭ и ТФЭ с картриджем последовательно, но это значительно увеличит продолжительность процесса подготовки пробы.

Помимо этого, желателен использовать внутренний стандарт в процессе подготовки пробы. В качестве внутреннего стандарта рекомендуется использовать дейтерированный стандарт ВРА. Если есть информация о том, какой именно бисфенол может быть в продукте, то в качестве внутреннего стандарта допускается использовать другой бисфенол, главное не использовать бисфенолы из критической пары, т.е. не использовать ВРС в качестве внутреннего стандарта для определения ВРВ и наоборот. Внутренний стандарт вносят на самом начальном этапе процесса подготовки пробы после взвешивания перед добавлением ацетонитрила.

Во избежание контаминации рекомендуется использовать стеклянную посуду. Всю пластиковую посуду и материалы (наконечники дозаторов, картриджи ТФЭ, пробирки, шприцевые фильтры и пр.) перед использованием необходимо проверять на фоновое содержание бисфенолов, проводя холостой опыт с использованием тех же растворителей и условий.

3.4. Оценка пределов количественного (LOQ) и качественного (LOD) обнаружения

Для расчетов пределов обнаружения по разработанной методике в растворе холостой пробы вносили растворы дериватизированных стандартных образцов для получения концентрации ≈ 5 мкг/100 мл. В качестве холостой пробы был использован образец изделия колбасного вареного «Любительская» в натуральной колбасной оболочке. Выбор именно этого изделия был обусловлен большим содержанием жира. Выбор натуральной колбасной оболочки обусловлен минимизацией риска приобретения образца с бисфенолами. Образец колбасного изделия был приобретен в местной сети магазинов розничной торговли (Москва). Образец был предварительно проверен на отсутствие бисфенолов в нем. Для расчетов было подготовлено 10 проб, каждая из которых закальвалась по 3 раза. Расчет LOD и LOQ был произведен по формулам:

$$LOD = 3,3 \times SD/b; \tag{3}$$

$$LOQ = 10 \times SD/b, \tag{4}$$

где: SD — стандартное отклонение площадей деривата бисфенола в холостой пробе; b — наклон калибровочной кривой.

Рассчитанные значения приведены в Таблице 3.

Рассчитанные значения пределов обнаружения бисфенолов в пробе показывают, что в реальных пробах возможно определение бисфенолов в довольно низких концентрациях, т.к. в процессе подготовки пробы аналиты концентрируются в 50–100 раз, соответственно, значения пределов обнаружения в реальных пробах

Таблица 3. LOQ и LOD разработанной методики

Table 3. LOQ and LOD of the developed method

Дериват	LOD, мкг/100 мл	LOQ, мкг/100 мл
ВРА	1,37	4,23
ВРВ	2,12	6,45
ВРС	1,88	5,72
ВРЕ	0,98	3,05
ВРФ	1,05	3,26
ВРАР	3,57	10,75

будут в 50–100 раз ниже, что сходится с результатами работы [22], но немного хуже чувствительности методик с ГХ–МС по [23,28,29] в 2–10 раз. А то, что такие пределы были обнаружены в холостой пробе мясной продукции, говорит о том, что в целом ее можно использовать для исследований разной продукции животного происхождения (мясо, мясо птицы, яйца, молочная продукция). В целом данную методику можно использовать и для продукции растительного происхождения, т.к. в ней содержится меньшее количество липидов и других неполярных соединений (если это не растительные масла), поэтому пробы продукции растительного происхождения теоретически должны быть чище, а пределы обнаружения будут еще меньше. Но в продукции растительного происхождения содержится большое количество углеводов, органических кислот, которые тоже будут оказывать влияние на пределы обнаружения, поэтому для продукции растительного происхождения желателен проводить расчеты пределов обнаружения дополнительно.

То, что пределы обнаружения бисфенолов при использовании ГХ–МС метода получаются зачастую значительно ниже, чем при использовании ВЭЖХ–МС/МС, отмечено и в работе [30]. Но можно доработать процесс подготовки пробы, чтоб достичь еще большей чувствительности метода. Например, использование магнитной ТФЭ позволяет увеличить чувствительность методики еще в 10–40 раз [31,32].

3.4. Оценка пригодности разработанной методики для определения бисфенолов в реальных пробах

Для оценки пригодности разработанной методики были проведены исследования 5 наименований блюд первых и вторых обеденных с гарниром охлажденных (макароны со свиной котлетой, рис с курицей, плов, борщ и гречка с гуляшом). Все образцы были приобретены в местной сети магазинов розничной торговли (Москва). Во всех исследованных образцах не были обнаружены бисфенолы (<LOD). После этого было решено провести аналогичный эксперимент с изделием колбасным вареным. Для этого готовилось бралось 9 навесок образца в которые вносили смесь стандартных образцов бисфенолов для получения концентраций в итоговых растворах после дериватизации на уровнях ≈ 10,0, 50,0 и 100,0 мкг/100 мл, чтобы оценить весь диапазон градуировочной кривой. Для каждой концентрации готовили по 3 образца. Результаты представлены в виде «среднее значение ± стандартное отклонение» (Таблица 4).

В Таблице 4 приведены проценты экстракции определяемых аналитов на разных уровнях градуировочной кривой, исходя из которых можно говорить о пригодности разработанной методики для определения бисфенолов в пищевой продукции. При концентрациях близких к 50 и 100 мкг отмечаются небольшие потери введенных аналитов. А вот уже при концентрациях близких к 10 мкг потери составляют до 15%. Справедливо предположить, что при более низких концентрациях потери будут еще больше. Самые большие потери были обнаружены у ВРАР 14,2% и ВРВ 12%, что похоже на картину по влиянию матричного эффекта матрицы молочной продукции на сигналы бисфенолов в [20]. В целом неточности в определении ВРВ и ВРАР предполагались ранее, когда описывалась дериватиза-

Таблица 4. Результаты определения внесенных бисфенолов, мкг/100 мл

Table 4. Results of the determination of the introduced bisphenols, µg/100 ml

Аналит	введено	найдено	%*	введено	найдено	%*	введено	найдено	%*
ВРА	11,6	10,8±1,5	93,1	58	56,2±3,4	96,9	116	116,5±2,1	99,2
ВРВ	10,0	9,2±2,7	88,0	50	51,7±5,5	103,4	100	95,1±12,1	95,1
ВРС	9,9	9,4±2,1	91,9	49,5	47,1±5,2	95,2	99	98,4±7,4	99,4
ВРЕ	11,0	10,7±0,9	92,7	55	54,3±2,1	98,7	110	109,2±5,8	99,3
ВРФ	9,6	9,6±1,1	100,0	48	47,1±2,2	98,1	96	95,7±5,5	99,7
ВРАР	12,0	11,1±3,1	85,8	60	53±5,6	88,3	120	110,8±9,9	92,3

* процент экстракции.

ция и инструментальный метод. Исходя из полученных результатов можно заключить, что разработанная методика подходит для экспериментальных работ по определению факторов, влияющих на миграцию бисфенолов, т.к. при воздействии температур или нагреве в СВЧ печи пищевой продукции в пластиковых контейнерах уровни миграции бисфенолов будут доходить до больших концентраций. При использовании же настоящей методики для каких-то мониторинговых исследований продукции на содержание бисфенолов рекомендуется проводить перед исследованиями дополнительные работы по потерям аналитов при подготовке пробы и влиянию матричного эффекта на сигнал.

Сильные потери аналитов при низких концентрациях в результате потерь при подготовке пробы или из-за матричного эффекта отмечается всеми работами в этом направлении. Потери бисфенолов при концентрациях 0,1–0,5 мкг/100 мл до 40 % отмечены в работе [23]. Потери из-за использования PSA, которые нами предполагались, подтверждены и работой [33]. Как уже отмечалось, большая жирность продукта приводит к сильному матричному эффекту. Подавление сигнала из-за высокой жирности при довольно высоких концентрациях 10 мкг/100 мл составляет до 10–20 %. В работе [32] Pais-Costa et al. показали сильные потери для ВРАФ аналогичные нашим для ВРАР. В ней так же отмечены и сильные потери для ВРФ, в нашей же работе ВРФ продемонстрировал хорошие результаты. Но влияние матричного эффекта из-за жира в пробе можно решить использованием магнитной ТФЭ или специальные QuChERS для жирной продукции (так называемые FATChERS). Их использование позволяет значительно повышать чувствительность методики [33].

4. Заключение

В результате проведенной работы была разработана методика определения 5 из 7 исследованных бисфенолов в пищевой продукции. Подобраны и обоснованы условия (температура и продолжительность) дериватизации с использованием МСТФА определяемых аналитов для придания им свойств (летучесть и термостабильность) необходимых для их газохроматографической идентификации.

Подобранные условия хроматографического разделения позволяют в нужной степени разделить ($R_s > 1,0$) определяемые аналиты за исключением критической пары ВРВ и ВРС ($R_s = 0,58$).

Разработанные условия экстрагирования аналитов позволяют соблюсти баланс между высокой степенью экстракции и достаточной степенью очистки образца от мешающих сигналу компонентов пищевого продукта, чтобы обеспечить довольно высокую чувствительность методики.

Все это свидетельствует о том, что разработанная методика может быть использована для исследования пищевой продукции на содержание в ней бисфенолов. Причем бисфенолов не только описанных в настоящей работе, но и других аналогов (ВРЗ, ВРАФ и пр.), так как почти все используемые в настоящее время аналоги ВРА для производства поликарбоната, схожи по своим свойствам.

При этом важно отметить, что для определения некоторых бисфенолов может понадобиться предварительная небольшая доработка методики, как, например, для ВРС или ВРАР в части их дериватизации. Что касается критических пар при хроматографическом разделении, как показанной ВРВ–ВРС в настоящей работе, так и теоретически возможных других, эту проблему можно решить подбором более плавного температурного градиента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes and Processing Aids (CEP), Lambré, C., Baviera, J. M. B., Bolognesi, C., Chesson, A. et al. (2023). Re-evaluation of the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs. *EFSA Journal*, 21(4), Article e06857. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.6857>
- Abraham, A., Chakraborty, P. (2020). A review on sources and health impacts of bisphenol A. *Reviews on Environmental Health*, 35(2), 201–210. <https://doi.org/10.1515/reveh-2019-0034>
- Rime, C., Delic, S., Onidi, A., Cretegnay, L., Hopf, N.B., Davide Staedler, D. et al. (2025). Assessing bisphenols migration from children's products on the Swiss market: Simulated oral exposure and risk implications. *Chemosphere*, 393, Article 144772. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144772>
- Kodila, A., Franko, N., Dolenc, M. S. (2023). A review on immunomodulatory effects of BPA analogues. *Archives of Toxicology*, 97, 1831–1846. <https://doi.org/10.1007/s00204-023-03519-y>
- Alin, J., Hakkarainen, M. (2012). Migration from polycarbonate packaging to food simulants during microwave heating. *Polymer Degradation and Stability*, 97(8), 1387–1395. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.05.017>
- Juric, M., Franz, R., Welle, F. (2024). Determination of diffusion coefficients of bisphenol A (BPA) in polyethylene terephthalate (PET) to estimate migration of BPA from recycled PET into foods. *Applied Sciences*, 14, Article 7704. <https://doi.org/10.3390/app14197704>
- Wang, X., Nag, R., Brunton, N. P., Siddique, M. A. B., Harrison, S. M., Monahan, F. J. et al. (2022). Human health risk assessment of bisphenol A (BPA) through meat products. *Environmental Research*, 213, Article 113734. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113734>
- Kovačić, A., Gys, C., Gulin, M.R., Kosjek, T., Heath, D., Covaci, A. et al. (2020). The migration of bisphenols from beverage cans and reusable sports bottles. *Food Chemistry*, 331, Article 127326. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127326>
- Datta, S., Chauhan, A., Ranjan, A., Sardar, A.H., Tuli, H.S., Seema Ramniwas, S. et al. (2023). Assessing the migration of BPA and phthalic acid from take-out food containers: Implications for health and environmental sustainability in India. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 11(6), 964–975. [https://doi.org/10.18006/2023.11\(6\).964.975](https://doi.org/10.18006/2023.11(6).964.975)
- Lim, J.-E., Liao, C., Moon, H.-B. (2023). Occurrence and exposure assessment of bisphenol analogues through different types of drinking water in Korea. *Exposure and Health*, 15, 185–197. <https://doi.org/10.1007/s12403-022-00483-3>
- Zainuddin, A. H., Roslan, M. Q. J., Razak, M. R., Yusoff, F. M., Haron, D. E. M., Aris, A. Z. (2023). Occurrence, distribution, and ecological risk of bisphenol analogues in marine ecosystem of urbanized coast and estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 192, Article 115019. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115019>
- Jin, H., Zhu, L. (2016). Occurrence and partitioning of bisphenol analogues in water and sediment from Liaohhe River Basin and Taihu Lake, China. *Water Research*, 103, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.059>
- Zhang, H., Zhang, Y., Li, J., Yang, M. (2019). Occurrence and exposure assessment of bisphenol analogues in source water and drinking water in China. *Science of the Total Environment*, 665, 607–613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.053>
- Česen, M., Lenarčič, K., Mislje, V., Levstek, M., Kovačić, A., Cimrmančič, B. et al. (2018). The occurrence and source identification of bisphenol compounds in wastewaters. *Science of the Total Environment*, 616–617, 744–752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.252>
- Kiejza, D., Kotowska, U., Polinska, W., Karpinska, J. (2022). USAEME–GC/MS method for easy and sensitive determination of bisphenols in wastewater. *Molecules*, 27(15), Article 4977. <https://doi.org/10.3390/molecules27154977>
- Gao, Y., Xiao, S.-K., Wu, Q., Pan, C.-G. (2023). Bisphenol analogues in water and sediment from the Beibu Gulf, South China Sea: Occurrence, partitioning and risk assessment. *Science of the Total Environment*, 857(Part 2), Article 159445. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159445>
- Wang, Z., Yu, J., Yao, J., Wu, L., Xiao, H., Wang, J. et al. (2018). Simultaneous identification and quantification of bisphenol A and 12 bisphenol analogues in environmental samples using precolumn derivatization and ultra high performance liquid chromatography with tandem mass spectrometry. *Journal of Separation Science*, 41(10), 2269–2278. <https://doi.org/10.1002/jssc.201701087>
- Hou, W., Zhu, Y.-Q., Yang, Y.-J., Yu, Q.-W. (2025). Loofah sponge-based solid-phase extraction in combination with high-performance liquid chromatography-fluorescence detection (HPLC-FLD) for analysis of bisphenols in environmental water. *Journal of Chromatography A*, 1756, Article 466055. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2025.466055>
- Zulfikar, H., Llompart, M., Montero, N., Duque-Villaverde, A., Fabbri, D. (2025). Development of an analytical method based on derivatization solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry for the determination of bisphenol analogues in environmental waters. *Journal of Chromatography A*, 1763, Article 466453. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2025.466453>
- Hu, Z., Sun, W., Guo, J., Wang, X., Yong, L., Ren, L. et al. (2025). Establishment and application of a high-performance liquid chromatography-mass spectrometry method for analysis of 15 bisphenols and halogenated phenols in tea. *Food Chemistry*, 469, Article 142561. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142561>
- Cheng, Y., Nie, X.-m., Wu, H.-q., Hong, Y.-h., Yang, B.-c., Liu, T. et al. (2017). A high-throughput screening method of bisphenols, bisphenols diglycidyl ethers and their derivatives in dairy products by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 950, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.11.006>
- Deceuninck, Y., Bichon, E., Gény, T., Veyrand, B., Grandin, F., Viguié, C. et al. (2019). Quantitative method for conjugated metabolites of bisphenol A and bisphenol S determination in food of animal origin by Ultra High Performance Liquid Chromatography – tandem Mass Spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1601, 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.05.001>
- Lucarini, F., Gasco, R., Staedler, D. (2023). Simultaneous quantification of 16 bisphenol analogues in food matrices. *Toxics*, 11(8), Article 665. <https://doi.org/10.3390/toxics11080665>
- Louppis, A. P., Kontominas, M.G. (2024). Recent developments (2020–23) on the use of LC in the determination of food contaminants. *Separations*, 11(12), Article 342. <https://doi.org/10.3390/separations11120342>
- Akbari, N., Başaran, B., Ghazi-Khansari, M., Akbari-Adergani, B., Bakhtiyari, A., Shavali-gilani, P. et al. (2024). Common and novel methods for the identification of bisphenol A in tea samples: A systematic review study. *Microchemical Journal*, 207, Article 111724. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111724>
- Temerdashev, A., Atapattu, S. N., Feng, Y.-Q. (2024). A tutorial on solid-phase analytical derivatization in sample preparation applications. *Journal of Chromatography Open*, 6, Article 100157. <https://doi.org/10.1016/j.jcoa.2024.100157>
- Wang, X., Ma, J., Wang, Z., Guo, R., Hu, X. (2014). Aqueous phototransformation of bisphenol S: The competitive radical-attack pathway to p-hydroxybenzenesulfonic acid. *Water Science and Technology*, 70(3), 540–547. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.257>
- Owczarek, K., Waraksa, E., Kłodzińska, E., Zrobok, Y., Ozimek, M., Rachoń, D., et al. (2022). Validated GC–MS method for determination of bisphenol A and its

- five analogues in dietary and nutritional supplements. *Microchemical Journal*, 180, Article 107643. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107643>
29. Catarro, G., Pelixo, R., Feijó, M., Rosado, T., Socorro, S., Araújo, A. R. T. S. et al. (2025). Analytical approaches using GC–MS for the detection of pollutants in wastewater towards environmental and human health benefits: A comprehensive review. *Chemosensors*, 13(7), Article 253. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13070253>
30. Gupta, R. K., Pipliya, S., Karunanithi, S., Enswaran U, G. M., Kumar, S., Mandliya, S. et al. (2024). Migration of chemical compounds from packaging into foods: Mechanisms, modelling and mitigation. *Foods*, 13(19), Article 3125. <https://doi.org/10.3390/foods13193125>
31. Koti, S., Hosseini, M.-J., Shariatifar, N., Alizadeh, A. M., Izadpanah, F. (2025). Determination of bisphenol A in different types of soft drink samples by MSPE–GC/MS technique and contribution to risk assessment. *Scientific Reports*, 15, Article 2353. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09306-2>
32. Pais-Costa, A. J., Marques, A., Oliveira, H., Gonçalves, A., Camacho, C., Augusto, H. C. et al. (2025). New perspectives on canned fish quality and safety on the road to sustainability. *Foods*, 14(1), Article 99. <https://doi.org/10.3390/foods14010099>
33. Santana-Mayor, A., Rodríguez-Ramos, R., Herrera-Herrera, A. V., Socas-Rodríguez, B., Rodríguez-Delgado, M. A. (2023). Updated overview of QuEChERS applications in food, environmental and biological analysis (2020–2023). *TrAC – Trends in Analytical Chemistry*, 169, 117375. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117375>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Утьянов Дмитрий Александрович — кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория «Научно-методические работы, биологические и аналитические исследования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: d.utyanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7693-3032 * автор для контактов</p>	<p>Dmitry A. Utyanov, Scientific Worker, Laboratory of Scientifically-Methodical Works and Control-Analytical Researches, V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: d.utyanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7693-3032 * corresponding author</p>
<p>Вострикова Наталья Леонидовна — доктор технических наук, Руководитель Научно-исследовательского испытательного центра. Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: n.vostrikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9395-705X</p>	<p>Natalia L. Vostrikova, Doctor of Technical Sciences, Head of the Research Testing Center, V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia. E-mail: n.vostrikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9395-705X</p>
<p>Андрей В. Гутнов — кандидат химических наук, доцент, кафедра химии и биотехнологии, Северо-Осетинский государственный университет 362025, Республика Северная Осетия — Алания, Владикавказ, Ватутина, 44–46 E-mail: gutnov@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4492-7639</p>	<p>Andrey V. Gutnov, Candidate of Chemical Sciences, Docent, Department of Chemistry and Biotechnology, North-Ossetian State University 44–46, Vatutina str., Vladikavkaz, North Ossetia — Alania, 362025, Russia E-mail: gutnov@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4492-7639</p>
<p>Захарова Варвара Алексеевна — младший научный сотрудник, лаборатория «Научно-методические работы, биологические и аналитические исследования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: v.zakharova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1862-7410</p>	<p>Varvara A. Zakharova, Junior Researcher, Laboratory of Scientifically-Methodical Works and Control-Analytical Researches, V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: v.zakharova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1862-7410</p>
<p>Иванов Алексей Антонович — старший техник лаборатории «Научно-методические работы, биологические и аналитические исследования», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: a.ivanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7660-1291</p>	<p>Aleksei A. Ivanov, Senior Technician, Laboratory of Scientifically-Methodical Works and Control-Analytical Researches, V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: a.ivanov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7660-1291</p>
<p>Полищук Екатерина Константиновна — младший научный сотрудник, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 E-mail: e.politchuk@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2719-9649</p>	<p>Ekaterina K. Polishchuk, Junior Researcher, Experimental Clinic — Research Laboratory of Biologically Active Substances of an Animal Origin, V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: e.politchuk@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2719-9649</p>
<p>Критерии авторства</p> <p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.</p>	<p>Contribution</p> <p>Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.</p>
<p>Конфликт интересов</p> <p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>	<p>Conflict of interest</p> <p>The authors declare no conflict of interest.</p>

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-129-137>

Поступила 23.02.2026

Поступила после рецензирования 20.03.2026

Принята в печать 26.03.2026

© Гладышева М. С., Молодкина Н. Р., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

ТРЕНДЫ И ТЕМАТИЧЕСКИЕ КЛАСТЕРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ *HERMETIA ILLUCENS* В ЦИРКУЛЯРНОЙ БИОЭКОНОМИКЕ

Гладышева М. С.*, Молодкина Н. Р.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

Hermetia illucens,
био конверсия,
органические
отходы, валоризация,
циркулярная
биоэкономика,
библиометрический
анализ

Рост численности населения и прогнозируемый дефицит животного белка к 2050 году диктуют необходимость поиска эффективных методов утилизации органических отходов, объем которых достигает 1,3 млрд тонн ежегодно. Личинки *Hermetia illucens* (чёрная львинка) рассматриваются как ключевой элемент циркулярной биоэкономики, способный трансформировать низкоценную органику в высококачественную биомассу. Целью данной работы является анализ мировых исследовательских трендов для определения стратегий преодоления технологического разрыва в промышленной био конверсии. На основе протокола PRISMA сформирована база из 283 публикаций из базы данных Scopus за 2010–2025 гг., которая подверглась кластерному и временному анализу в программной среде VOSviewer. В ходе исследования выявлено четыре тематических кластера, структурирующих область знаний от фундаментальных дескрипторов до прикладных моделей валоризации. Установлено, что наиболее динамично развивающийся сегмент связан с концепцией глубокой переработки органических отходов (в т.ч. пищевых) личинками мухи чёрной львинки для получения продуктов с высокой добавленной стоимостью. Анализ временных трендов показал смещение фокуса с простого сокращения объёмов отходов к изучению симбиотического взаимодействия личинок с микробиомом и оптимизации переработки специфических отходов. На основе полученных данных сделан вывод, что ключевым барьером для индустрии остается нестабильность биохимического состава продукции, что зависит как от не контролируемого входного субстрата, так и от преобладания ручного культивирования. В качестве решения предлагается интеграция автоматизированных систем культивирования, что позволит управлять метаболической пластичностью личинок и обеспечит стабильный выход биоактивных субстанций при переработке различных типов органических субстратов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках темы НИР № 625137 «Экотехнологические подходы к устойчивой переработке и валоризации органических отходов» (Университет ИТМО).

Received 23.02.2025

Accepted in revised 20.03.2026

Accepted for publication 26.03.2026

© Gladysheva M. S., Molodkina N. R., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

TRENDS AND CLUSTERS OF *HERMETIA ILLUCENS* RESEARCH IN CIRCULAR BIOECONOMY

Marina S. Gladysheva*, Nelli R. Molodkina

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

KEYWORDS:

Hermetia illucens,
Bioconversion,
Organic waste,
Waste valorization,
Circular bioeconomy,
Bibliometric analysis

ABSTRACT

Population growth and the projected shortage of animal protein by 2050 necessitate the development of effective methods for recycling organic waste, which amounts to 1.3 billion tons annually. *Hermetia illucens* (black soldier fly) larvae are recognized as a key element of the circular bioeconomy, capable of transforming low-value organic matter into high-quality biomass. The aim of this study is to analyze global research trends to identify strategies for overcoming the technological gap in industrial bioconversion. Based on the PRISMA protocol, a database of 283 Scopus publications (2010–2025) was formed and subjected to cluster and temporal analysis using the VOSviewer software environment. The study identified four thematic clusters structuring the knowledge field from fundamental descriptors to applied valorization models. It was established that the most dynamically developing segment is associated with the concept of deep processing of organic waste (including food waste) by black soldier fly larvae to obtain high-value-added products. Temporal trend analysis revealed a shift in focus from simple waste reduction toward studying the symbiotic interaction between larvae and the microbiome, as well as optimizing the processing of specific waste streams. The findings indicate that the primary barrier for the industry remains the instability of the biochemical composition of the products, which depends on both uncontrolled input substrates and the dominance of manual rearing. The integration of automated cultivation systems is proposed as a solution, enabling management of larval metabolic plasticity and ensuring a stable yield of bioactive substances during the processing of various organic substrates.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. 625137 “Ecotechnological approaches to sustainable processing and valorization of organic waste” (ITMO University).

1. Введение

Согласно прогнозам, к 2080 году население планеты достигнет 10,4 млрд человек, что повлечет за собой резкий рост спроса на продовольствие и, как следствие, увеличение объемов органических отходов [1]. Ежегодно в мире выбрасывается около 1,3 млрд тонн продуктов, что составляет треть всего производимого продо-

вольствия [2]. В Российской Федерации ежегодно образуется около 82,3 млн тонн органических отходов, из которых до 90% направляется на полигонное захоронение [3]. Это приводит не только к исключению ценных нутриентов из трофологических цепей, но и к другим экологическим проблемам. В рамках решения данных проблем личинки мухи чёрная львинка (*Hermetia illucens*) рассматриваются

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гладышева, М. С., Молодкина, Н. Р. (202X). Тренды и тематические кластеры исследований *Hermetia illucens* в циркулярной биоэкономике. *Пищевые системы*, 9(1), 129–137. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-129-137>

FOR CITATION: Gladysheva, M. S., Molodkina, N. R. (202X). Trends and clusters of *Hermetia illucens* research in circular bioeconomy. *Food Systems*, 9(1), 129–137. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-129-137>

как ключевой участник циркулярной биоэкономики, способный к высокоэффективной биоконверсии субстратов, образующихся в результате продовольственного процесса.

Личинки *Hermetia illucens* признаны ключевым организмом циркулярной биоэкономики благодаря их способности трансформировать низкоценную органику в богатую нутриентами биомассу (до 40–63% сырого протеина и 15–40% жира в сухом веществе), сокращать объем отходов на 50–70% за короткий цикл (10–15 дней), снижать выбросы парниковых газов (например, метана), которые неизбежны при анаэробном разложении органики на полигонах [1,4].

Помимо роста органических отходов, связанных с интенсификацией человеческой деятельности, также, по данным FAO (Food and Agriculture Organization) спрос на животный белок вырастет на 50–70% к 2050 году [5]. Говоря о теме роста потребностей в животном белке нельзя не отметить, что традиционные источники белка для аквакультуры и животноводства (рыбная мука и соя) становятся все более дорогостоящими и экологически неустойчивыми. В индустрии животноводства затраты на корма составляют от 60% до 80% от общих производственных расходов. Данное положение диктует острую необходимость поиска альтернативных, высококачественных и доступных ингредиентов, например, таких как энтомопротеин [6].

Исследования последних десятилетий демонстрируют широту прикладного потенциала *Hermetia illucens*. Ранние работы фокусировались на фундаментальной возможности биоконверсии пальмового шрота [7] и навоза [8]. Современный вектор сместился в сторону получения продуктов с высокой добавленной стоимостью, таких как биодизель [9,10], специализированные корма для аквакультуры и птицеводства [11,12], а также биополимеры — хитин и хитозан [13,14]. Особый интерес вызывают антимикробные пептиды (АМП), которые способна производить личинка чёрной львинки. Актуальность их изучения обусловлена глобальным кризисом резистентности патогенов к традиционным антибиотикам. У *Hermetia illucens* идентифицировано одно из крупнейших семейств генов АМП среди насекомых [15,16], включая дефензины и цекропины, способные физически разрушать мембраны таких патогенов, как *E. coli* и *S. Aureus* [17,18]. Тем не менее, несмотря на достаточный массив научных данных, доказывающих интерес к теме биоконверсии органических (в т.ч. пищевых) отходов, в индустрии сохраняется технологический разрыв: преобладающее ручное лоточное культивирование ведет к нестабильности биохимического состава личинок и дороговизне данной технологии, что препятствует её повсеместному внедрению.

2. Объекты и методы

В качестве объекта исследования были выбраны научные публикации мирового сообщества, индексируемые в международной базе данных Scopus. Формирование базы данных происходило из англоязычных статей при использовании в поисковом запросе ключевых слов, таких как *Hermetia illucens*, black soldier fly, circular bioeconomy, bioconversion, antimicrobial peptides, chitin, lipids, protein, frass, automation. Использование перечисленных терминов позволило сформировать репрезентативную выборку, отражающую глобальные тенденции в рассматриваемой области.

Последующая систематизация полученной выборки производилась по схеме PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses / Предпочтительные элементы отчетности для систематических обзоров и метаанализов), разработанная для улучшения отчетности по систематическому обзору. По данной схеме авторами работы был выполнен отсев найденных статей по следующим критериям:

- база данных для поиска статей: Scopus (п. 6 Information sources);
- временной период: анализировались статьи с 2010 по 2025 гг. (п. 5 Eligibility criteria);
- тип документа: статьи и материалы конференций (п. 5 Eligibility criteria);
- направление используемых исследований: производился поиск по ключевым словам, используя поисковый запрос (“*Hermetia illucens*” OR “black soldier fly”) AND (“circular bioeconomy” OR “bioconversion”) AND (“antimicrobial peptides” OR “chitin” OR “melanin” OR “lipids” OR “protein” OR “frass” OR “zoohumus” OR “automation” OR “bioreactor”) (п. 7 Search strategy);
- технический скрининг статей: наличие в собранной базе аннотации, ключевых слов авторов, а также доступ к полному тексту статей (п. 8 Selection process);
- тематический скрининг статей: включение работ, которые рассматривали личинок *Hermetia illucens* как агентов биоконверсии органических (преимущественно пищевых) отходов (п. 5 Eligibility criteria).

Данная последовательность действий позволила создать рабочую базу данных, которая в дальнейшем подверглась обработке при помощи программного обеспечения для выделения кластеров. После обработки статей по данной схеме из первоначальной выборки, выгруженной из базы данных Scopus в количестве 463 штук, в итоговой выборке получилось 283 статьи. На Рисунке 1 представлена схема составления итоговой базы данных.

Для обработки полученных метаданных 283 отобранных статей использовалось программное обеспечение VOSviewer (версия 1.6.19, Nees Jan van Eck и Ludo Waltman, Нидерланды). Основным методом исследования для определения кластеров был выбран анализ встречаемости ключевых слов автора (Keyword Co-occurrence), который позволяет визуализировать структуру предметной области и связи между её элементами. Поскольку во время технического скрининга авторами было отмечено, что некоторые ключевые слова могут встречаться как полным написанием, так и аббревиатурой (например, «antimicrobial peptides» и «AMPs») или наличие терминов-синонимов (например, «BSFL», «*Hermetia illucens*» и «black soldier fly larvae»), то перед запуском алгоритмов программы был создан файльтезаур, что позволило сделать построенные карты более точными и не содержащими дублирующей по смыслу информации.

В качестве параметров анализа в программном обеспечении использовались подсчет силы связи между терминами методом полного подсчета (Full counting). Для нормализации силы связи между узлами сети применялся метод фракционирования (Fractionalization). Выбор данного метода обусловлен необходимостью минимизировать влияние отдельных публикаций с аномально большим количеством ключевых слов, что обеспечивает более равномерное распределение элементов в кластерах и повышает интерпретируемость связей в сетевой визуализации. Минимальный порог частоты встречаемости термина (Minimum number of occurrences) был установлен на уровне 5-ти раз, что позволило сфокусировать анализ на наиболее устойчивых исследовательских трендах.

На заключительном этапе подготовки рукописи авторами работы использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (Notebook LM, разработчик Google Labs) исключительно для улучшения языкового оформления: в целях изменения стиля подачи, устранения грамматических, пунктуационных ошибок. Авторы несут полную ответственность за содержание и оригинальность представленной работы.



3. Результаты и обсуждение

В результате анализа итоговой выборки были построены несколько визуализаций:

- Для представления полученных кластеров — сетевая визуализация (Network Visualization), представляющая связь между терминами, формирующими тематические кластеры. Согласно алгоритму программы, расстояние между узлами на карте отражает научную близость терминов.
- Для оценки динамики развития тематик по годам — временная визуализация (Overlay Visualization), где цвет узла является индикатором по среднему году публикации.
- Для выявления областей с наибольшей концентрацией публикаций — визуализация плотности (Density Visualization), что позволяет обосновать актуальность и новизну выбранного направления

исследований культивирования личинок мухи чёрная львинка при использовании органических (в т.ч. пищевых) отходов.

3.1. Структура мирового исследовательского поля *Hermetia illucens*

В результате библиометрического анализа итоговой выборки (n = 283) была построена сетевая визуализация со-встречаемости ключевых слов, представленная на Рисунке 2. На сформированной карте было выделено 4 доминирующих тематических кластера, отражающих основные направления развития отрасли.

В Таблице 1 представлена подробная характеристика четырех доминирующих тематических кластеров, отражающая их терминологический состав, содержательную интерпретацию и актуальный фокус научной активности.

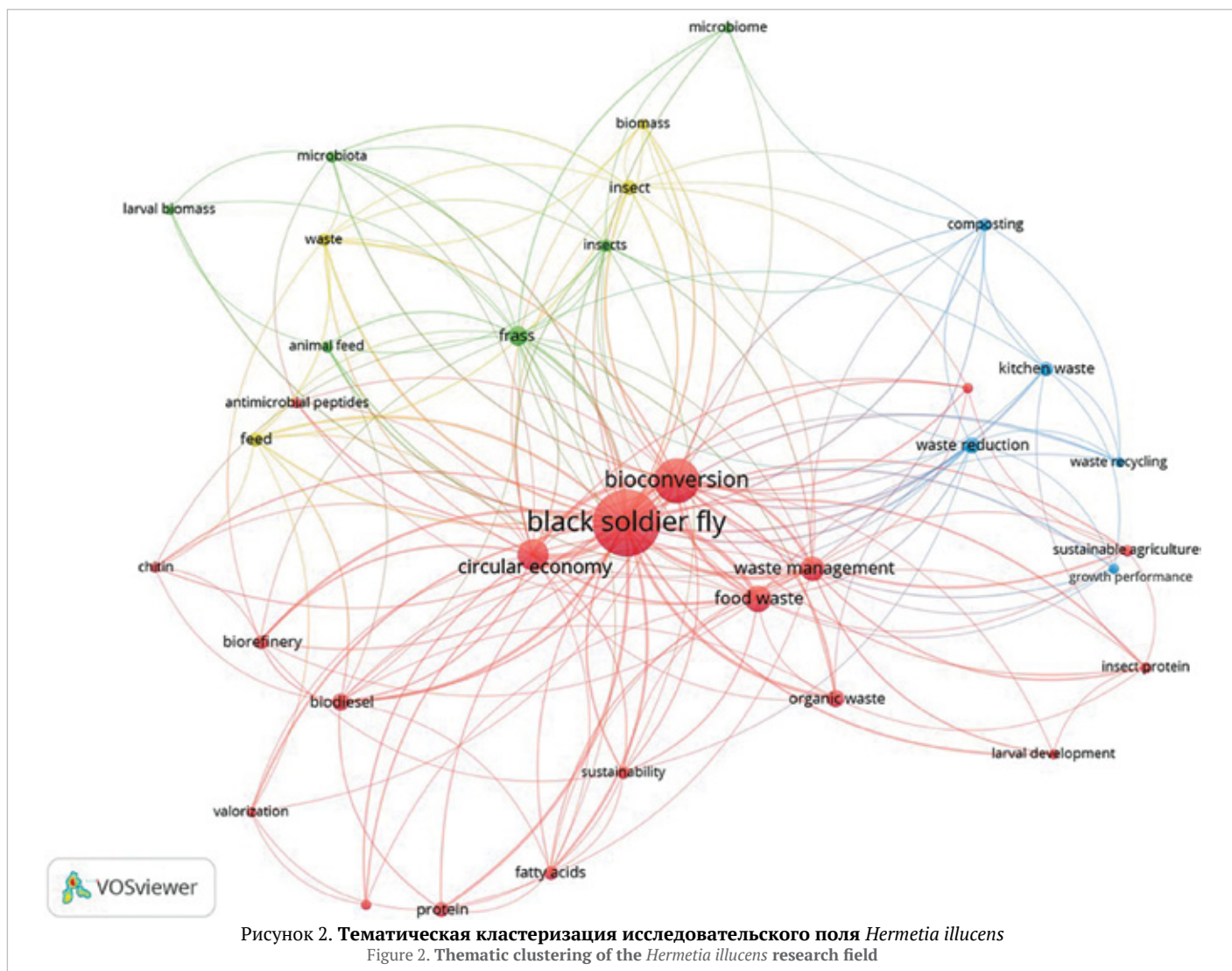


Рисунок 2. Тематическая кластеризация исследовательского поля *Hermetia illucens*
Figure 2. Thematic clustering of the *Hermetia illucens* research field

Таблица 1. Тематическая кластеризация мирового исследовательского поля *Hermetia illucens*
Table 1. Thematic clustering of the global research field of *Hermetia illucens*

Тематическая интерпретация	Кластер	Ключевые слова в кластерах	Основной фокус исследований
Валоризация отходов и продукты глубокой переработки	Кластер 1 (красный)	antimicrobial peptides; bioconversion; biodiesel; biorefinery; black soldier fly; circular economy; fatty acids; food waste; insect protein; insect-based bioconversion; larval development; nutrient recycling; organic waste; protein; sustainability; sustainable agriculture; waste management, valorization	Глубокая биотехнологическая переработка входного сырья с выделением высокоценных соединений
Биологические механизмы и зоогумус	Кластер 2 (зелёный)	animal feed; frass; insects; larval biomass; microbiome; microbiota	Изучение симбиотического взаимодействия личинки с микробиомом, механизмов метаболической пластичности и агрохимического потенциала зоогумуса
Технологические показатели и утилизация	Кластер 3 (синий)	composting; growth performance; kitchen waste; waste recycling; waste reduction	Оптимизация параметров био конверсии и разработка промышленных технологий утилизации отходов
Фундаментальные ресурсные дескрипторы	Кластер 4 (жёлтый)	biomass; feed; insect; waste	Взаимосвязь базовых понятий, связывающих биологический потенциал с параметрами промышленной био конверсии

Проанализировав Кластер 1, можно идентифицировать его как «Валоризация органических отходов и продукты глубокой переработки», поскольку он охватывает термины, показывающие временный переход от простой утилизации отходов к концепции глубокой переработки биомассы для получения продуктов высокого передела. Также стоит отметить концепцию биорефайнинг, которая встречается в зарубежных статьях [19–21] и означает систему глубокой, комплексной переработки органического сырья, где насекомое выступает в роли «биологического реактора», превращающего низкоценные отходы в целый ряд коммерчески значимых продуктов: белок, жиры (сырьё для биодизеля), хитин и антимикробные пептиды.

Данный кластер является наиболее масштабным в рамках данной выборки и позволяет сделать вывод об актуальности перехода от простой утилизации отходов к стратегии их комплексной трансформации в высокотехнологичные продукты.

Говоря о продуктах с высокой добавленной стоимостью, чаще всего упоминаются энтомопротеин, липиды (включая лауриновую кислоту), антимикробные пептиды, хитин-меланиновый комплекс. Анализируя сформированную базу данных, можно отметить, что чаще всего в качестве целевого продукта упоминаются энтомопротеин и аминокислоты — 142 статьи, что составляет 50,2% от всей выборки и подтверждает статус базового продукта индустрии. Исследования направлены на замену рыбной муки и соевого шрота в кормах для АПК и аквакультуры. Липиды фигурируют в 98 статьях (34,6% от всех статей в выборке), где особое внимание уделено лауриновой кислоте (C12:0). Антимикробные пептиды стали предметом 43 исследований (15,2% от всех статей в выборке), причем большая часть работ относится к периоду 2021–2025 гг., что говорит о высоком интересе к данной тематике в настоящее время. Хитин-меланиновый комплекс упоминается в 31 статье (10,9% от всех статей в выборке), несмотря на меньшее количество работ, это направление демонстрирует высокую динамику сложности: от простой экстракции хитина к созданию биопластиков.

Анализ связей в Кластере 1 подтверждает глобальное смещение исследовательского вектора от простой утилизации органики к стратегии её глубокой биотехнологической валоризации. Реализация концепции энтомологического биорефайнинга позволяет рассматривать получение ряда продуктов с высокой добавленной стоимостью — антимикробных пептидов, биодизеля и энтомопротеина, что обеспечивает переход к устойчивой модели циркулярной биоэкономики.

Кластер 2 позволяет сфокусироваться на изучении внутренних физиологических процессов личинок и качества побочных продуктов биоконверсии, связывая фундаментальную биологию насекомого с практической ценностью получаемых ресурсов.

Исследования в данном направлении показывают, что личинки *H. illucens* представляют собой сложную симбиотическую систему [22]. Также установлено, что личинки активно используют ресурсы своего кишечного микробиома. Бактерии семейства *Bacillaceae* играют решающую роль в деградации трудноперевариваемых растительных полимеров (целлюлозы и лигнина) [23]. Установлено, что микробиотическое сообщество способно синтезировать до 35% необходимых личинке незаменимых аминокислот при их дефиците в субстрате [24].

Также в рамках данного кластера акцент смещается на саму биомассу личинок, где одним из направления работ может являться изучение метаболической пластичности личинок — их способности подстраивать биохимию организма и активность ферментов под нутриентный профиль субстрата [25]. Процесс накопления веществ зависит от того, является ли конкретный нутриент генетически детерминированным или гибко реагирующим на состав диеты [26].

Анализ сетевых взаимодействий в рамках Кластера 2 доказывает, что эффективность энтомологической биоконверсии детерминирована не только биологическими факторами, но и синергетическим взаимодействием *H. illucens* с ассоциированным микробиомом. Личинки функционируют как сложная симбиотическая система, способная активно формировать специфические функциональные микроорганизмы для интенсификации деградации трудноперевариваемых растительных биополимеров. Установленное взаимодействие обеспечивает высокую метаболическую пластичность, что открывает возможности для перехода к направленному культивированию и получению биомассы с заданными биохимическими характеристиками (в пределах нормы реакции организма).

Кластер 3 объединяет прикладные исследования, сфокусированные на оценке практической эффективности процесса биоконверсии. Основное внимание здесь уделяется количественным метрикам переработки и оптимизации условий содержания личинок для достижения максимальных темпов утилизации отходов. Согласно данному направлению исследований, личинки *H. illucens* призна-

ны высокоэффективным инструментом для валоризации пищевых остатков домохозяйств и предприятий общественного питания [27, 28]. Исследования показывают, что кухонные отходы являются одним из наиболее подходящих субстратов для развития личинок, обеспечивая высокую скорость набора массы [29,30], однако, также упоминается, что сезонное влияние на состав данных отходов влияет на стабильность процесса биоконверсии [27,31]. Данное положение требует внесения дополнительных добавок в состав субстрата и установление технологических параметров проведения процесса.

В качестве количественных метрик используют показатели роста и развития, где анализируют взаимосвязь между исходным количеством личинок в начале процесса конверсии, влажностью субстрата и такими показателями, как коэффициент конверсии корма (FCR), удельная скорость роста и финальная масса личинки [32–36]. Установлено, что при оптимальных параметрах личинки способны сокращать объем и массу органических отходов на 50–70% за короткий цикл в 10–15 дней [37]. Поскольку для достижения данных параметров необходимо совершить переход к автоматизированному культивированию личинок при контролируемых параметрах, это становится одним из основных исследовательских направлений.

Также исследования, относящиеся к данному кластеру, позиционируют энтомологическую переработку как более быструю и экологически безопасную альтернативу традиционному компостированию. Рассматриваются комбинированные подходы, такие как двухстадийный процесс биоконверсия-компостирование, где личинки перерабатывают основную массу органики, а последующее созревание остатка происходит методами классического компостирования, что позволяет получить стабилизированное органическое удобрение высокого качества [38,39].

Анализ связей в Кластере 3 подтверждает, что мировой научный интерес в этой области перешел от простой констатации факта поедания отходов к технологическому нормированию. Выявленные закономерности роста и сокращения отходов служат основой для масштабирования технологии: от лабораторных экспериментов к промышленным системам, где критически важным становится контроль микроклимата.

Кластер 4 является наименьшим и завершающим кластером в структуре сетевой визуализации, несмотря на свою лаконичность, выполняет критическую функцию интегратора всего исследовательского поля, поскольку представляет собой центр знаний, на котором базируются все прикладные направления. Данную роль кластер играет за счет системообразующих дескрипторов, которые выступают связующим звеном между изучением жизненного цикла *H. illucens* и разработкой систем промышленной биоконверсии органических субстратов.

3.1.1. Продукты, получаемые в процессе биоконверсии пищевых отходов с использованием *H. Illucens*

Анализ статей, представленных в кластере 1, показывает, что биоконверсия пищевых отходов с использованием *H. Illucens* позволяет получать достаточное количество продуктов с высокой добавленной стоимостью. Личинки и предкуколки *H. illucens* характеризуются высоким содержанием сырого протеина, варьирующимся в диапазоне от 32% до 63% на сухое вещество (СВ) [40]. Аминокислотный профиль муки чёрной львинки является сбалансированным и сопоставимым с рыбной мукой высокого качества, при этом в биомассе преобладают такие аминокислоты, как лейцин, лизин и валин [41]. Ряд работ показывает, что энтомопротеин может успешно замещать соевый шрот и рыбную муку в рационах птиц, свиней и объектов аквакультуры без снижения показателей роста [42,43].

Липидная фракция является наиболее метаболически пластичным параметром и может составлять от 15% до 49% (в некоторых случаях до 62%) массы личинок в зависимости от исходного субстрата [25]. Уникальной особенностью жирнокислотного состава *H. illucens* является высокая концентрация лауриновой кислоты (C12:0), содержание которой может достигать 55–65% от общего профиля жирных кислот [41]. Лауриновая кислота обладает выраженными антимикробными, противовирусными и антигрибковыми свойствами, что позволяет использовать масло не только как источник энергии в кормах и сырье для биодизеля, но и как функциональный ингредиент в ветеринарии и косметологии [44].

Меланин, выделяемый из мухи чёрная львинка, представляет собой высокоценный природный биополимер с уникальными физико-химическими свойствами. В организме насекомого выполняет защитные функции и участвует в формировании экзоскелета. Переход личинки в стадию предкуколки и куколки визуально идентифицируется именно по накоплению меланина, что проявляется в потемнении

кутикулы от кремового до темно-коричневого или черного цвета [45]. Особый интерес представляет хитин-меланиновый комплекс, входящий в состав экзоскелета насекомого. Данный продукт ценится за свою биологическую активность, являясь мощной ловушкой для свободных радикалов и защищая клетки от окислительного стресса [46].

Следующим продуктом высокого передела является хитин — линейный полимер N-ацетил-D-глюкозамина, который является вторым по распространенности природным биополимером и важнейшим структурным компонентом экзоскелета насекомых [47]. В организме *H. illucens* хитин интегрирован в сложную матрицу, состоящую из белков и минеральных соединений, обеспечивая механическую жесткость кутикулы [48]. Содержание хитина в биомассе чёрной львинки демонстрирует выраженную стадиезависимую динамику, что обусловлено физиологической потребностью организма в упрочнении покровов на поздних этапах развития [49], что позволяет использовать данный процесс в технологической цепочке культивирования. Данный биополимер, полученный из *H. illucens*, характеризуется: высокой степенью деацетилирования, что определяет его реакционную способность и растворимость, а также выраженной биологической активностью — антимикробными, антивирусными и антигрибковыми свойствами [34,47,48]. Использование хитина, полученного из чёрной львинки и его производных в рамках современных пищевых систем является одним из наиболее перспективных направлений. Благодаря выраженным антимикробным и антигрибковым свойствам, хитозан может включаться в состав активной упаковки для предотвращения порчи продуктов и подавления роста патогенов, таких как *E. coli* и *S. aureus* [14]. Хитозан, как производное хитина, растворенный в кислой среде, применяется для нанесения защитных слоев на свежие продукты, что позволяет существенно продлить срок их хранения [49].

Антимикробные пептиды (АМП) личинок *H. illucens* — это низкомолекулярные белки, обладающие уникальным физико-химическим механизмом подавления патогенов — пептиды избирательно взаимодействуют с отрицательно заряженными мембранами бактериальных клеток (в частности, *E. coli* и *S. aureus*), вызывая их физическое разрушение [50]. Поскольку воздействие носит физический характер, риск развития быстрой устойчивости у микроорганизмов сводится к минимуму. Также АМП обладают высокой специфичностью к патогенам при низкой токсичности для клеток млекопитающих, что делает их перспективными для фармакологии. Говоря про области возможного применения АМП, выделенных из личинок чёрной львинки, можно отметить их использование в качестве иммуномодуляторов в кормах для АПК (птицеводство, животноводство), что позволяет полностью или частично отказаться от ветеринарных антибиотиков и повысить биобезопасность продуктов питания [51].

Рассматривая ключевые термины кластера 2, можно отметить следующий продукт, получаемый в процессе биоконверсии — фрасс, он же зоогукус, побочный продукт, который рассматривается как высокоэффективное органическое удобрение и биомелиорант [52]. Он богат макроэлементами (в среднем N: 4,9%, P: 2,6%, K: 1,7%) [53], при этом процесс биоконверсии увеличивает доступность минеральных веществ в 3 раза по сравнению с исходным сырьем [54]. Особое значение имеет наличие в зоогукусе хитиновых экзудатов, которые стимулируют защитные реакции растений и позволяют подавлять почвенных фитопатогенов, таких как *Ralstonia solanacearum* [55]. Применение фрасса способствует восстановлению здоровья почв.

В Таблице 2 представлены сводные результаты по возможности получения продуктов из *H. illucens* с указанием выхода продукции и ключевых характеристик.

3.2. Анализ временной динамики и глобальных трендов

Анализ временной динамики совместной встречаемости ключевых слов позволяет проследить качественную трансформацию мировых научных интересов в области энтомологической биоконверсии в период с 2020 по 2025 гг. Цветовая дифференциация узлов сети отражает хронологический вектор: от обработки базовых моделей утилизации отходов к прецизионному управлению качеством биомассы и получению субстанций с высокой добавленной стоимостью (Рисунок 3).

Стоит отметить, что несмотря на то, что поисковый запрос охватывал период с 2010 года, визуализация временной динамики демонстрирует распределение терминов в диапазоне 2022–2024 гг. Это обусловлено тем, что программное обеспечение VOSviewer оперирует показателем среднего года публикации. Учитывая взрывной рост числа исследований по теме *Hermetia illucens* в последние три года, статистический вес современных работ доминирует, смещая средние значения большинства ключевых дескрипторов к актуальному периоду.

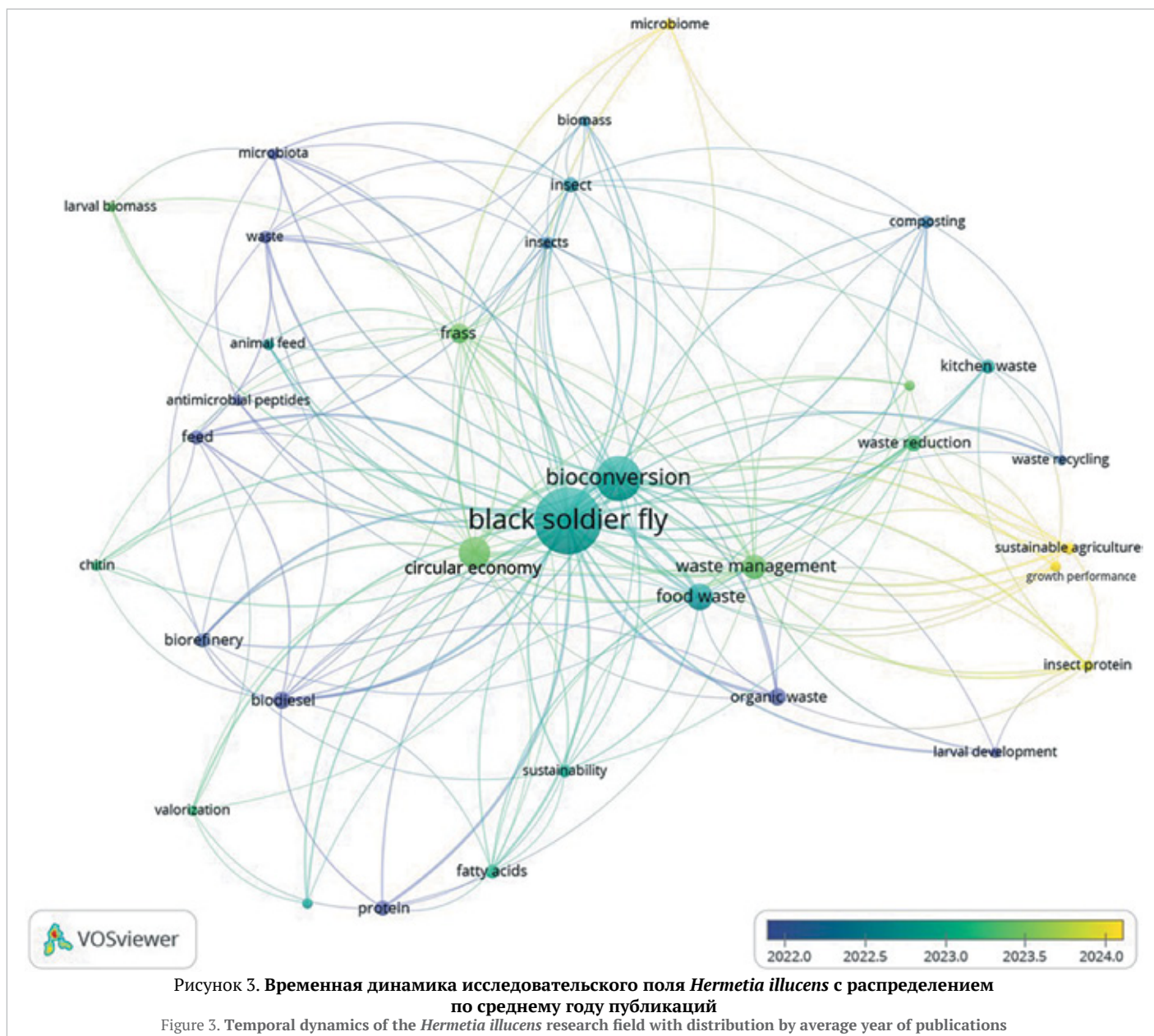
Первый этап (до 2022 г) характеризовался доминированием дескрипторов фундаментального уровня: waste, protein, biodiesel, feed. На данном этапе мировое научное сообщество было сосредоточено на доказательстве эффективности личинок *H. illucens* как инструмента трансформации органического сырья в кормовую белок и сырье для биотоплива. Основной акцент делался на решение экологических задач по сокращению объемов органических отходов.

Второй этап (2023 г.) характеризовался качественной трансформацией исследовательского фокуса, что указывало на трансформацию от объемов утилизации отходов к глубокому изучению биологических механизмов биоконверсии и валоризации побочных продуктов. В центр сетевой визуализации сместились дескрипторы larval biomass, frass, sustainability, valorization и chitin, что свидетельствует о переходе к пониманию личинки как сложной симбиотической

Таблица 2. Потенциал валоризации и ключевые показатели продуктов из биомассы *Hermetia illucens*

Table 2. Valorization potential and key indicators of *Hermetia illucens* biomass products

Продукт	Потенциальный выход (% на СВ)	Ключевые характеристики	Целевые отрасли применения	Жизненная стадия <i>H. illucens</i>	Источники
Энтомопротеин (мука, изолят)	32–63% (на СВ)	Сбалансированный аминокислотный профиль; богат незаменимыми аминокислотами, такими как лейцин, лизин и валин; высокая перевариваемость; альтернатива рыбной муке	АПК (корма для птиц, рыб, свиней); перспективный источник нутриентов и функциональный ингредиент	Личинка; предкуколка	[4,40,45, 56–58]
Липидный концентрат (масло)	5–62% (на СВ)	Высокое содержание лауриновой кислоты (C12:0) до 65%; преобладание насыщенных жирных кислот, доля которых достигает 77–84%; антимикробные, противовирусные и антигрибковые свойства	Фармакология; косметология; биоэнергетика (биодизель)	Личинка; предкуколка	[40,41,44, 47,54,59,60]
Антимикробные пептиды	2–30 мг (из 100 мл гемолимфы)	Термо- и pH-стабильность (до 100 °C и от 2,0 до 10,0 pH); большинство являются положительно заряженными и амфипатическими; действие против резистентных штаммов; низкая вероятность развития резистентности у патогенов и отсутствие токсичности для клеток млекопитающих	Функциональные кормовые добавки для замены кормовых антибиотиков; медицина и фармакология; пищевая промышленность (в качестве биоконсервантов); косметология	Личинка	[15–18, 61–64]
Хитин и хитозан	Хитин: 2,9–33% (на СВ) Хитозан: ~1,56% (на СВ)	Обладает высокой степенью кристалличности; биодegradабельность; химически устойчив и выдерживает температуры разложения в диапазоне 356–392 °C	Биомедицина и фармацевтика (ранозаживляющие покрытия, системы доставки лекарств); сельское хозяйство; пищевая промышленность и упаковка	Куколка; экзудат; имаго	[65–69]
Меланин	1,9–14,3% (на СВ)	Обладает высокой способностью нейтрализовать свободные радикалы; характеризуется высоким молекулярным весом, сильным отрицательным зарядом и гидрофобной природой	Косметология; фармакология; производство биополимеров	Предкуколка; куколка	[67,68,70]



системы. Параллельно с изучением биологических процессов, сформировался вектор на получение продуктов с высокой добавленной стоимостью. Особое внимание стало уделяться зоогумусу не как к отходу, а как эффективному биомелиоранту, также ключевые слова на визуализации данного периода фиксируют переход к моделям каскадной переработки биомассы, обеспечивающим максимальное извлечение нутриентов и биоактивных соединений.

Современный этап развития отрасли (2024–2025 гг.) сформировал вектор исследований, характеризующийся смещением научного интереса от базовой утилизации отходов к прецизионному управлению биохимическим профилем насекомых. Параллельно в актуальной литературе прослеживается тренд на технологическое нормирование и оптимизацию показателей роста (growth performance). Исследования этого периода направлены на установление жестких зависимостей между параметрами среды и эффективностью био-конверсии, что является фундаментом для промышленного масштабирования процесса. В рамках этого направления особую значимость приобретает узкая специализация субстратов, в частности выделение кухонных и ресторанных отходов (kitchen waste) как наиболее нутриентно плотного и биодоступного сырья для реализации концепции данной технологии.

3.3 Анализ плотности исследовательского поля

Для верификации структуры выявленных тематических групп и определения концентрации исследовательских тем была построена карта плотности кластеров (Рисунок 4). В данном режиме программного обеспечения цвет каждой точки определяется плот-

ностью ключевых слов в её окрестности, при этом веса элементов (частота встречаемости) суммируются и нормируются для каждого кластера отдельно.

Проанализировав карту плотности, можно отметить, что максимальная яркость и плотность наблюдаются в центре карты вокруг дескрипторов black soldier fly, bioconversion и circular economy. Это подтверждает, что фундаментальная концепция биооконверсии отходов является наиболее проработанной и консолидированной частью мирового научного знания. Высокая концентрация в зоне waste management и food waste указывает на то, что данные типы субстратов являются эталонными для отрасли.

Группа терминов composting, kitchen waste и waste reduction образует отчетливую, но менее плотную зону в правой части карты. Это указывает на то, что, хотя направления утилизации специфических отходов (например, кухонных) активно развиваются, они всё еще находятся в стадии накопления эмпирических данных и не достигли такой степени теоретической плотности, как центральное технологическое ядро.

Периферийное расположение и умеренная плотность узлов antimicrobial peptides, feed и chitin отражают специфику современного этапа развития. Несмотря на то, что выделение АМП и хитина являются актуальными трендами, их плотность на общей карте пока ниже, чем у привычных продуктов — белка, липидов и зоогумуса. Это подтверждает высокую научную новизну и возможности для глубоких исследований в области направленного культивирования биоактивных веществ.

- Engineering Research and Design*, 218, 428–437. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.04.045>
10. Mohan, K., Sathishkumar, P., Rajan, D. K., Rajarajeswaran, J., Ganesan, A. R. (2023). Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae as potential feedstock for the biodiesel production: Recent advances and challenges. *Science of the Total Environment*, 859(Part 1), Article 160235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160235>
 11. Camperio, J., Suarez, J. A., Simonton, J., Paresky, E., Parodi, J., Benetti, D. D. (2025). Valorizing organic waste through black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*): A sustainable solution for aquafeeds with key nutrients and natural bioactive polyphenols. *Sustainability*, 17(5), Article 1788. <https://doi.org/10.3390/su17051788>
 12. Melati, I. S., Heriyanti, A. P., Pitaloka, L. K., Muttaqin, M. R. N. (2026). Circular bioeconomy poultry feed pellets from food waste using black soldier fly larvae. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 27(1), 53–64. <https://doi.org/10.12912/27197050/214620>
 13. González-Lara, H., Parra-Pacheco, B., Rico-García, E., Aguirre-Becerra, H., Feregrino-Pérez, A. A., García-Trejo, J. F. (2025). Black soldier fly culture as a source of chitin and chitosan for its potential use in concrete: An Overview. *Polymers*, 17(6), Article 717. <https://doi.org/10.3390/polym17060717>
 14. Triunfo, M., Guarnieri, A., Ianniciello, D., Hahn, T., Zibek, S., Scieuzo, C. et al. (2025). Secondary products and bioactive compounds of *Hermetia illucens*: Extraction, chemical properties, and potential application of chitin and chitosan. Chapter in a book: *The Black Soldier Fly (Hermetia illucens): Sustainable Applications in Food, Feed, and Beyond*. Amsterdam: Elsevier, 2025. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-29896-7.00009-3>
 15. Szczepanik, K., Świątkiewicz, M. (2024). *Hermetia illucens* as a source of antimicrobial peptides — A review of *in vitro* and *in vivo* studies. *Annals of Animal Science*, 24(1), 3–16. <https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0071>
 16. Herman, N., Vitenberg, T., Hayouka, Z., Opatovsky, I. (2024). Regulation of antimicrobial peptides in *Hermetia illucens* in response to fungal exposure. *Scientific Reports*, 14, Article 29561. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80133-7>
 17. Yuan, R.-X., Ma, X.-Y., Lv, Y., Si, H.-B. (2026). Molecular diversity, structure — function relationship, mechanism of action, and transformative potential of black soldier fly antimicrobial peptides against multidrug-resistant pathogens. *Current Issues in Molecular Biology*, 48(1), Article 62. <https://doi.org/10.3390/cimb48010062>
 18. Scieuzo, C., Giglio, F., Rinaldi, R., Lekka, M. E., Cozzolino, F., Monaco, V. et al. (2023). *In vitro* evaluation of the antibacterial activity of the peptide fractions extracted from the hemolymph of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Insects*, 14(5), Article 464. <https://doi.org/10.3390/insects14050464>
 19. Sharma, R. D., Thangadurai, P. (2025). Sustainable bioprocessing of *Hermetia illucens* exuviae into structurally defined chitoooligosaccharides within a circular biorefinery framework. *Bioresource Technology Reports*, 32, Article 102400. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102400>
 20. Hosseingholilou, B., Ghoobadian, B., Motevali, A., Kamali, M., Birkved, M., Khoshn-evisan, B. (2025). Environmental sustainability assessment of a biorefinery platform utilizing black soldier fly larvae for organic waste valorization. *Sustainable Production and Consumption*, 58, 46–74. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.06.007>
 21. Singh, C. N., Healy, L., Chanu, N.S., Dwivedi, M. (2025). Design of value chains for insect processing biorefinery. Chapter in a book: *Innovative Biorefinery Processes for Agri-Food Value Chains*. Amsterdam: Elsevier, 2025. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28810-4.00003-7>
 22. Li, Z., Zhou, Y., Lv, L., Long, Y., Dong, M., Xiao, Q. et al. (2025). Host-mediated environmental microbiome recruitment by black soldier fly (*Hermetia illucens*) enhances waste biotransformation. *Waste Management*, 204, Article 114886. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114886>
 23. Klüber, P., Gurusinga, F. F., Hurka, S., Vilcinskas, A., Tegtmeyer, D. (2024). Turning trash into treasure: *Hermetia illucens* microbiome and biodegradation of industrial side streams. *Applied and Environmental Microbiology*, 90(11), Article e00991–24. <https://doi.org/10.1128/aem.00991-24>
 24. Lemme, A., Klüber, P. (2024). Rethinking amino acid nutrition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) based on insights from an amino acid reduction trial. *Insects*, 15(11), Article 862. <https://doi.org/10.3390/insects15110862>
 25. Scala, A., Cammack, J. A., Salvia, R., Scieuzo, C., Franco, A., Bufo, S. A. et al. (2020). Rearing substrate impacts growth and macronutrient composition of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) larvae produced at an industrial scale. *Scientific Reports*, 10, Article 19448. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76571-8>
 26. Singh, A., Marathe, D., Raghunathan, K., Kumari, K. (2022). Effect of different organic substrates on selected life history traits and nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*). *Environmental Entomology*, 51(1), 182–189. <https://doi.org/10.1093/ee/nvab135>
 27. Montevecchi, G., Macavei, L. I., Zanelli, E., Benassi, G., Pinotti, G., D'Arco, S. et al. (2023). Seasonal variability of the HO.RE.CA. food leftovers employed as a feeding substrate for black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae and effects on the rearing performance. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33, Article 101061. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101061>
 28. Cattaneo, A., Meneguz, M., Dabbou, S., Tambone, F., Scaglia, B. (2024). Local circular economy: BSF insect rearing in the Italian Agri-Food Industry. *Waste Management*, 179, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.03.016>
 29. Chapagae, P., Thapa, S., Shrestha, S., Puri, B., Ghimire, A., Bist, D. R. et al. (2026). Valorisation of organic wastes through black soldier fly (*Hermetia illucens*) Larvae: Impacts on growth, nutritional composition, and bioconversion efficiency. *Waste Management Bulletin*, 4(1), Article 100278. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100278>
 30. Wang, T., Yin, T., Liu, X., Huang, Z. (2025). Facilitating bioconversion of kitchen waste by *Hermetia illucens* L. for enhanced production of insect protein: The key role of probiotic pretreatment. *Food and Fermentation Industries*, 51(5), 157–164. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.041038> (In Chinese).
 31. Fuso, A., Barbi, S., Macavei, L. I., Luparelli, A. V., Maistrello, L., Montorsi, M. et al. (2021). Effect of the rearing substrate on total protein and amino acid composition in black soldier fly prepupae intended for animal feed. *Foods*, 10(8), Article 1773. <https://doi.org/10.3390/foods10081773>
 32. Kharel, N., Gautam, B., Pokhrel, M. R., Tiwari, S., Barsila, S. R., Patten, M. A. et al. (2026). Density and substrate-dependent performance of black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) reared on locally available biowastes in Nepal: Effects on growth, bioconversion, and nutritional composition. *Cleaner Waste Systems*, 13, Article 100482. <https://doi.org/10.1016/j.cwsys.2026.100482>
 33. Li, G. (2024). Optimization of breeding and economic benefit analysis based on self-supply of black soldier fly eggs. *Environmental Sanitation Engineering*, 32(6), 50–56. <https://doi.org/10.19841/j.cnki.hjwsgc.2024.06.007>
 34. Nayak, A., Rühl, M., Klüber, P. (2024). *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): Need, potentiality, and performance measures. *Agriculture*, 14(1), Article 8. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010008>
 35. Cheng, J. Y. K., Chiu, S. L. H., Lo, I. M. C. (2017). Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion. *Waste Management*, 67, 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.046>
 36. Nahrowi, Dafri, I., Sabrina, D. N., Ridla, M., Jayanegara, A., Martin, R. S. H. et al. (2025). Performance and nutritional quality of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae fed diets with varying crude protein and carbohydrate ratios. *Journal of Insects as Food and Feed*, 11(16), 2939–2953. <https://doi.org/10.1163/23524588-bja10242>
 37. Arya, E. S., Srinivasan, M., Shanthi, M., Saravanan, S., Mini, M.L. (2025). Black soldier fly (*Hermetia illucens*): Driving circular agriculture through organic waste recovery. *Plant Science Today*, 12(5), Article 8629. <https://doi.org/10.14719/pst.8629>
 38. Cai, M., Zhang, K., Zhong, W., Liu, N., Wu, X., Li, W. et al. (2019). Bioconversion-composting of golden needle mushroom (*Flammulina velutipes*) root waste by black soldier fly (*Hermetia illucens*, Diptera: Stratiomyidae) larvae, to obtain added-value biomass and fertilizer. *Waste and Biomass Valorization*, 10(2), 265–273. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0063-2>
 39. Wu, N., Yu, X., Liang, J., Mao, Z., Ma, Y., Wang, Z. et al. (2023). A full recycling chain of food waste with straw addition mediated by black soldier fly larvae: Focus on fresh frass quality, secondary composting, and its fertilizing effect on maize. *Science of the Total Environment*, 885, Article 163386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163386>
 40. Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L.-H. L., Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117, 58–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>
 41. Rawski, M., Mazurkiewicz, J., Kierończyk, B., Józefiak, D. (2020). Black soldier fly full-fat larvae meal as an alternative to fish meal and fish oil in Siberian sturgeon nutrition: The effects on physical properties of the feed, animal growth performance, and feed acceptance and utilization. *Animals*, 10(11), Article 2119. <https://doi.org/10.3390/ani10112119>
 42. Mohammad, S. F., Shah, A.A., Wanapat, M., El-Mogy, M.M., Al-Hoshani, N., Alyami, E.M. (2026). Utilizing insects to convert waste into nutrients for sustainable feed and food production. *Entomological Research*, 56(2), Article e70105. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.70105>
 43. Caisin, L. (2025). Waste-to-feed bioconversion using *Hermetia illucens* Larvae: Current insights and prospects. *Open Veterinary Journal*, 15(11), 5427–5448. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2025.v15.i11.1>
 44. Zandi-Sohani, N., Tomberlin, J. K. (2024). Comparison of growth and composition of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae reared on sugarcane by-products and other substrates. *Insects*, 15(10), Article 771. <https://doi.org/10.3390/insects15100771>
 45. Logan, L. A. P., Latty, T., Roberts, T. H. (2021). Effective bioconversion of farmed chicken products by black soldier fly larvae at commercially relevant growth temperatures. *Journal of Applied Entomology*, 145(6), 621–628. <https://doi.org/10.1111/jen.12878>
 46. Almeida, C., Rijo, P., Rosado, C. (2020). Bioactive compounds from *Hermetia illucens* larvae as natural ingredients for cosmetic application. *Biomolecules*, 10(7), Article 976. <https://doi.org/10.3390/biom10070976>
 47. Smets, R., Verbinen, B., De Voorde, I.V., Aerts, G., Claes, J., Van Der Borgh, M. (2020). Sequential extraction and characterisation of lipids, proteins, and chitin from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae, prepupae, and pupae. *Waste and Biomass Valorization*, 11(12), 6455–6466. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00924-2>
 48. Fischer, H., Romano, N., Sinha, A. K. (2021). Conversion of spent coffee and donuts by black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae into potential resources for animal and plant farming. *Insects*, 12(4), Article 332. <https://doi.org/10.3390/insects12040332>
 49. Farina, P., Abenaim, L., Conti, B. (2021). Enemies and allies: The different roles of insects towards fruit and vegetable loss and waste. *Agrochimica*, 65(Special Issue), 9–16.
 50. Шевченко, Н. И., Гусева, Ю. А., Васильев, А. А., Пигина, С. Ю., Николаев, С. И. (2024). Альтернатива антибиотиков — антимикробные пептиды черной львинки (*Hermetia Illucens*) (обзор). *Известия Нижневолжского Агроуниверситетского Комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*, 1(73), 201–210. [Shevchenko, N. I., Guseva, Yu. A., Vasiliev, A. A., Pigina, S. Yu., Nikolaev, S. I. (2024). Alternative to antibiotics — Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) antimicrobial peptides (Review). *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education* 1(73), 201–210. (In Russian)]
 51. Xia, J., Ge, C., Yao, H. (2021). Antimicrobial peptides from black soldier fly (*Hermetia illucens*) as potential antimicrobial factors representing an alternative to antibiotics in livestock farming. *Animals*, 11(7), Article 1937. <https://doi.org/10.3390/ani11071937>
 52. De Santis, E., de Iudicibus, A., Lecce, F., De Mei, M., Petrazzuolo, F., Del Giudice, A., Carnevale, M. et al. (2024). A multidisciplinary approach for the development of a supply chain in biomass conversion of agrifood waste mediated by larvae of *Hermetia illucens* L.: From rearing to by-product exploitation. *Agriculture*, 14(7), Article 1010. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071010>
 53. Magee, K., Halstead, J., Small, R., Young, I. (2021). Valorisation of organic waste by-products using black soldier fly (*Hermetia illucens*) as a bio-converter. *Sustainability*, 13(15), Article 8345. <https://doi.org/10.3390/su13158345>

54. Hanafi, T., Meziane, K. Z., Megateli, S., Moussaoui, B., Guemou, L., Reghioui, B. (2024). Bio-treatment of cheese whey by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared in Algeria. *Journal of Agriculture and Applied Biology*, 5(1), 125–141. <https://doi.org/10.11594/jaab.05.01.10>
55. Ji, X., Zhou, S., Chen, W., Cao, B., Sun, Y., Che, Q. et al. (2025). Black soldier fly and microbiome collaborate to bioconvert the tofu whey water in an efficient and environment-friendly manner. *Journal of Water Process Engineering*, 68, Article 106888. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106888>
56. Ganvir, K. P., Darvekar, A. N., Raut, V. D., Thorat, R. K. (2022). Effect of locally generated food waste on bioconversion and nutrient parameters of black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* L. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 10(5), 108–116. <https://doi.org/10.22271/j.ento.2022.v10.i6b.9096>
57. Azizah, A. A., Ekawati, A. W., Nursyam, H. (2020). Potential the black soldier fly (*Hermetia illucens*) in feed formulation for growth of common carp (*Cyprinus carpio* L.). *Research Journal of Life Science*, 7(3), 154–161. <https://doi.org/10.21776/ub.rjls.2020.007.03.5>
58. Giannetto, A., Oliva, S., Riolo, K., Savastano, D., Parrino, V., Cappello, T. et al. (2020). Waste valorization via *Hermetia illucens* to produce protein-rich biomass for feed: Insight into the critical nutrient taurine. *Animals*, 10(9), Article 1710. <https://doi.org/10.3390/ani10091710>
59. Leni, G., Del Vecchio, L., Dellapina, C., Moliterni, V. M. C., Caligiani, A., Cirilini, M. (2024). Black soldier fly larvae grown on hemp fiber: Nutritional composition and production of potential bioactive peptides. *Macromol*, 4(1), Article 0007. <https://doi.org/10.3390/macromol4010007>
60. Sibonje, J., Riungu, J., James, K. (2023). Bioconversion of faecal and kitchen waste using black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*): Mass balance process. *African Journal of Science, Technology and Social Sciences*, 2(2), 19–29. <https://doi.org/10.58506/ajstss.v2i2.163>
61. Hoc, B., Genva, M., Fauconnier, M.-L., Lognay, G., Francis, F., Megido, R. C. (2020). About lipid metabolism in *Hermetia illucens* (L. 1758): On the origin of fatty acids in prepupae. *Scientific Reports*, 10(1), Article 11916. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68784-8>
62. Widiyastuti, T., Rahayu, S., Suryapratama, W., Suhartati, F. M. (2024). Nutrient profile, protease and cellulase activities of protein extracted from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae reared on various substrates. *Online Journal of Animal and Feed Research*, 14(5), 309–320. <https://doi.org/10.51227/ojaf.2024.36>
63. Alvarez, D., Wilkinson, K.A., Treilhou, M., Téné, N., Castillo, D., Sauvain M. (2019). Prospecting peptides isolated from black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) With antimicrobial activity against *Helicobacter pylori* (*Campylobacteres*: Helicobacteraceae). *Journal of Insect Science*, 19(6), Article 17. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iez120>
64. Di Somma, A., Moretta, A., Cané, C., Scieuzo, C., Salvia, R., Falabella, P. et al. (2022). Structural and functional characterization of a novel recombinant antimicrobial peptide from *Hermetia illucens*. *Current Issues in Molecular Biology*, 44(1), 1–13. Article 0001. <https://doi.org/10.3390/cimb44010001>
65. Zabulione, A., Šalaševičienė, A., Makštutienė, N., Sarkinas, A. (2023). Exploring the antimicrobial potential and stability of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae fat for enhanced food shelf-life. *Gels*, 9(10), Article 793. <https://doi.org/10.3390/gels9100793>
66. Van Moll, L., De Smet, J., Paas, A., Tegtmeier, D., Vilcinska, A., Cos, P. et al. (2022). *In vitro* evaluation of antimicrobial peptides from the black soldier fly (*Hermetia illucens*) against a selection of human pathogens. *Microbiology Spectrum*, 10(1), Article e01664–21. <https://doi.org/10.1128/spectrum.01664-21>
67. Peng, T.H., Wei, L.K., Chiang, E.C.W., Yoon, M.S.O. (2022). Antibacterial properties of chitosan isolated from the black soldier fly, *Hermetia illucens*. *Sains Malaysiana*, 51(12), 3923–3935. <https://doi.org/10.17576/jsm-2022-5112-05>
68. Yuan, B. -Q., Yu, T.-H., Chen, S.-C., Zhang, Z.-Q., Guo, Z.-K., Huang, G.-X. et al. (2024). Physical and chemical characterization of chitin and chitosan extracted under different treatments from black soldier fly. *International Journal of Biological Macromolecules*, 279(Part 2), Article 135228. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135228>
69. Khayrova, A., Lopatin, S. (2022). The potential of *Hermetia Illucens* as a source of chitin, chitosan and their melanin complexes. *Polymer Science: Peer Review Journal*, 3(4) Article 000568. <https://doi.org/10.31031/PSPRJ.2022.03.000568>
70. Schäfer, H. L., Gandras, J., Schneider, L., Witthohn, M., Troidl, K., Muffler, K. et al. (2025). Analysis, properties, and applications of insect-derived chitosan: a sustainable path to functional polysaccharide materials. *Gels*, 11(4), Article 291. <https://doi.org/10.3390/gels11040291>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Гладышева Марина Сергеевна — аспирант, факультет экотехнологий, Университет ИТМО 191002, Санкт-Петербург. ул. Ломоносова, 9 E-mail: msgladysheva@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6764-7991 * автор для контактов	Marina S. Gladysheva , Graduate Student, Faculty of Ecotechnologies (GreenTech), ITMO University 9, Lomonosova Str., St. Petersburg, 191002, Russia E-mail: msgladysheva@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6764-7991 * corresponding author
Молодкина Нелли Ринатовна — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, факультет экотехнологий, Университет ИТМО 191002. Санкт-Петербург. ул. Ломоносова, 9 E-mail: nrmolodkina@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6956-4547	Nelli R. Molodkina , Candidate of Technical Sciences, Docent, Head of the Laboratory, Faculty of Ecotechnologies (GreenTech), ITMO University 9, Lomonosova Str., St. Petersburg, 191002, Russia E-mail: nrmolodkina@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6956-4547
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-138-150>



Received 06.08.2025

Accepted in revised 23.03.2026

Accepted for publication 23.03.2026

© Syaputri Y., Bariz A. N., Kusmiati R., Wulandari I., Rahayu S. R., Safitri R., Iwahashi H., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

EXPLORING THE RICHNESS OF INDONESIAN FERMENTED FOODS: PRESERVATION, NUTRITION, AND HEALTH BENEFITS

Yolani Syaputri^{1,2*}, Anisa Mariah Bariz¹, Rita Kusmiati¹, Indri Wulandari¹,
Sri Rejeki Rahayu^{1,2}, Ratu Safitri¹, Hitoshi Iwahashi³

¹Department of Biology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University Padjadjaran, Jatinangor, West Java, Indonesia

²Center for Bioprospection of Natural Fibers and Biological Resources, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University Padjadjaran, Jatinangor, West Java, Indonesia

³Laboratory of Microbiology, Faculty of Dentistry, Meikai University, Chiba, Japan

KEYWORDS:

Indonesian fermented food, fungi, lactic acid bacteria, traditional foods

ABSTRACT

Fermentation is an ancient preservation method that can improve the nutritional profile of food. This method enhances the organoleptic characteristics and shelf life of food. The use of microorganisms has become a pillar of cultural identity and technological advancement in food, resulting in highly nutritious foods such as peyeum, brem, terasi, tauco, dadih, tape ketan, oncom, and acar. This review study aims to present a comprehensive and in-depth data of the variety of traditional fermented foods found across the Indonesian archipelago. This review will systematically explore the practice of food fermentation in Indonesia. It will cover the local raw materials used, production methods passed down from generation to generation, the role of microbes in improving nutritional quality, and the taxonomic identification of lactic acid bacteria and fungi involved in the fermentation process of these traditional foods. In addition, the nutritional content and potential health benefits will also be analyzed in this review. Through extensive literature review, this study seeks to summarize and synthesize the existing knowledge regarding the richness and uniqueness of Indonesian fermented foods. In the face of globalization that threatens culinary diversity, a deep understanding and efforts to preserve traditional fermentation practices have become increasingly urgent. Such actions are not only crucial to protect invaluable culinary heritage from potential degradation but also plays a vital role as a supporting instrument to meet nutritional needs of the community sustainably and potentially empowering local economic growth through the optimal utilization of abundant food resources in various regions.

FUNDING: The authors express their gratitude to Universitas Padjadjaran for funding this study through the Hibah Internal Riset Kompetensi Dosen Unpad (RKDU) (grant no. 4580/UN6.D/PT.00/2025).

Поступила 06.08.2025

Поступила после рецензирования 23.02.2026

Принята в печать 23.03.2026

© Сьяпутри Ю., Бариз А. Н., Кусмиати Р., Вуландари И.,
Рахаю С. Р., Сафитри Р., Ивахаси Х., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

АНАЛИЗ ИЗОБИЛИЯ ИНДОНЕЗИЙСКИХ ФЕРМЕНТИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ: ХРАНЕНИЕ, ПИТАНИЕ И ПОЛЬЗА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ

Сьяпутри Ю.^{1,2,*}, Бариз А. Н.¹, Кусмиати Р.¹, Вуландари И.¹,
Рахаю С. Р.^{1,2}, Сафитри Р.¹, Ивахаси Х.³

¹Кафедра биологии, факультет математики и естественных наук, Университет Паджаджаран, Джатинангор, Западная Ява, Индонезия

²Центр биоанализа натуральных волокон и биологических ресурсов, факультет математики и естественных наук, Университет Паджаджаран, Джатинангор, Западная Ява, Индонезия

³Лаборатория микробиологии, стоматологический факультет, Университет Мейкай, Тиба, Япония

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

индонезийские ферментированные пищевые продукты, грибы, молочнокислые бактерии, традиционные пищевые продукты

Ферментация — метод сохранения пищевых продуктов, используемый с древних времен, может существенно продлить срок годности и повысить ценность различных традиционных индонезийских пищевых продуктов с большим разнообразием вкусов и культурных традиций, таких как пейеум, брем, тераси, тауко, дадих, кекап манис, тапе кетан, онком и акар. Целью данного исследования было предоставление исчерпывающих и глубоких данных по разнообразию традиционных ферментированных пищевых продуктов, которые встречаются на всём индонезийском архипелаге. В данной работе детально изучается историческое происхождение, разнообразие используемого местного сырья, стадии производства, которые часто передаются от поколения к поколению, важная роль различных типов микроорганизмов в трансформации пищевых продуктов, идентификация и значение молочнокислых бактерий и грибов, которые вносят вклад в уникальные характеристики продуктов, а также подчеркиваются высокое содержание пищевых веществ и потенциальная польза для здоровья от потребления этих традиционных ферментированных продуктов. На основе обзора обширной литературы, в данном исследовании обобщены существующие знания об изобилии и уникальности индонезийских ферментированных продуктов. В условиях глобализации, которая угрожает кулинарному разнообразию, глубокое понимание и усилия по сохранению традиционных практик приготовления ферментированных пищевых продуктов становятся всё более насущными. Такие действия

FOR CITATION: Syaputri, Y., Bariz, A. N., Kusmiati, R., Wulandari, I., Rahayu, S. R., Safitri, R. et al. (2026). Exploring the richness of Indonesian fermented foods: Preservation, nutrition, and health benefits. *Food Systems*, 9(1), 138–150. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-138-150>

Для ЦИТИРОВАНИЯ: Сьяпутри, Ю., Бариз, А. Н., Кусмиати, Р., Вуландари, И., Рахаю, С. Р., Сафитри, Р. и др. (2026). Анализ изобилия индонезийских ферментированных продуктов: Хранение, питание и польза для здоровья. *Пищевые системы*, 9(1), 138–150. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-138-150>

не только критически важны для защиты бесценного кулинарного наследия от угрозы исчезновения, но также играют важную роль в соответствии потребностям в пищевых веществах, обладая потенциалом поддержки экономического роста местных сообществ экологически рациональным образом в результате оптимального использования обильных пищевых ресурсов в разных регионах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Авторы выражают свою благодарность Паджаджаранскому университету за финансирование этого исследования в рамках гранта на развитие Внутренней Исследовательской Компетентности Преподавателей Unpad (RKDU) (грант № 4580 / UN6.D / PT.00/2025).

1. Introduction

Indonesia, as a tropical archipelago with abundant biodiversity. These geographical conditions play a crucial role in various local agricultural activities. The agricultural sector not only plays a role in supporting national food security, but also contributes significantly to the economic structure, the livelihoods of the community, and national identity [1]. One of the outcomes of Indonesia's agricultural system is the emergence of diverse food processing techniques tailored to the country's climate conditions and local resources. Among these techniques is fermentation, which functions as a vital food preservation method in cultural and economic contexts [2]. Fermentation has evolved as a sustainable and economical preservation methods that contribute to increased nutrient bioavailability, extended food shelf life, and enhanced food safety [3]. Fermentation is a food preservation solution, especially for areas with limited access to refrigeration technology. Microorganism activity, such as lactic acid bacteria and mold in foods like tempeh, contributes positively to food shelf life [4]. The diversity of fermented foods in Indonesia reflects the cultural and ecological richness of each region. The raw materials, fermentation techniques, and types of microorganisms used vary widely from one area to another [5,6]. Figure 1 illustrates the distribution of fermented foods across the Indonesian archipelago, highlighting local adaptations to available resources.

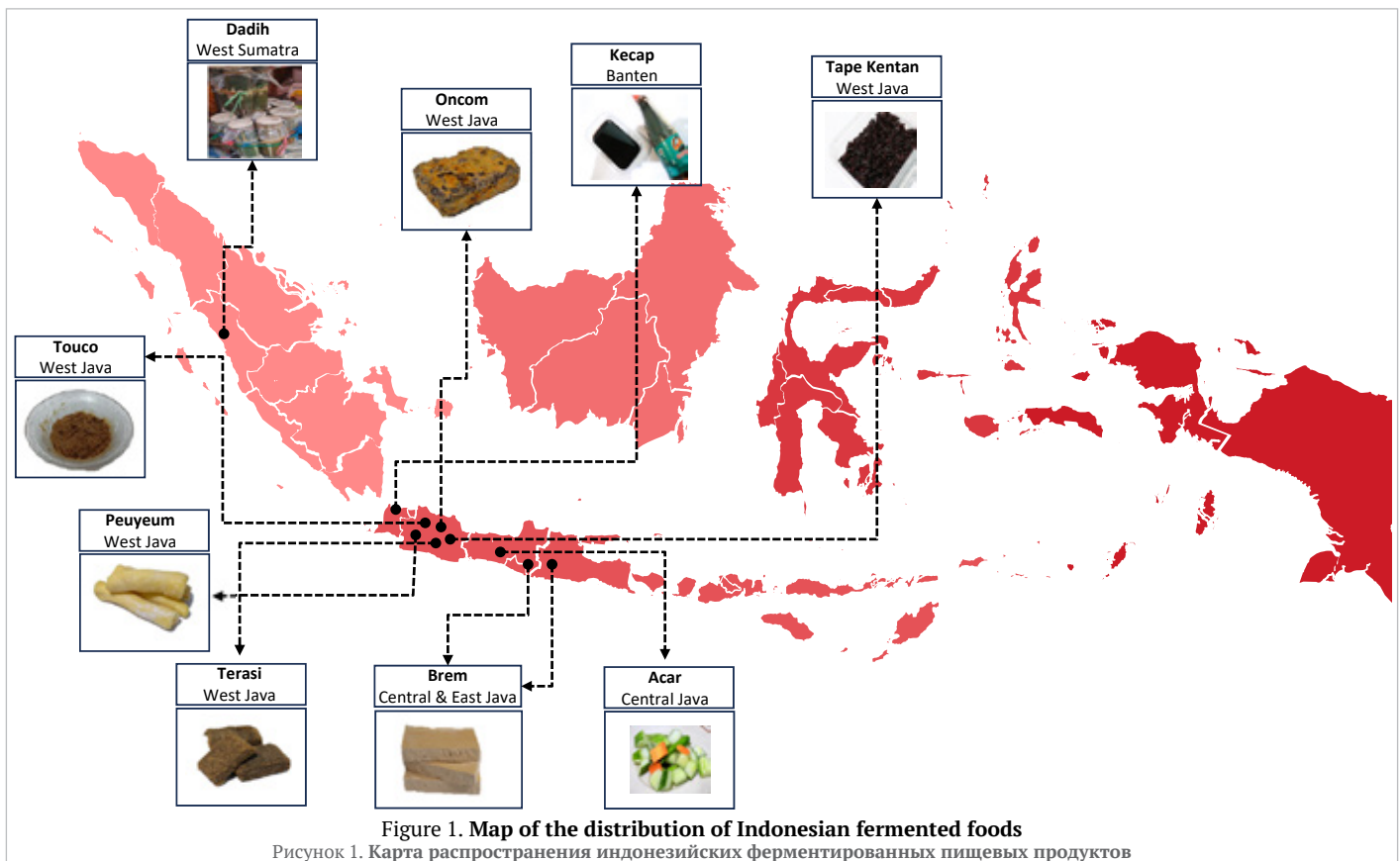
Scientifically, fermentation is a biochemical process involving controlled microbial activity, resulting in changes in food composition through enzymatic reactions [7]. This process not only modifies the taste and texture of food but also enhances nutritional content and improves food safety. One of the primary mechanisms is the production of lactic acid by LAB, which lowers the pH and creates an environment unfavorable for pathogens [8]. The interaction between various microorganisms, such as fungi, bacteria, and yeasts, contributes to the production of complex fermented products with rich nutritional benefits [9]. Microorganisms involved in Indonesian food fermentation include various bacterial

species such as *Leuconostoc mesenteroides*, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Limosilactobacillus fermentum*, and *Lactocaseibacillus rhamnosus* [10–12]. On the other hand, fungi like *Rhizopus oligosporus* and *Aspergillus oryzae* play important roles in products such as tempeh and soy sauce [13]. With growing global attention on the health benefits of fermented foods, Indonesian fermented products are beginning to gain international recognition, particularly due to their probiotic content, which supports digestive health, immunity, and food system sustainability [7]. However, systematic studies comparing the microbiological composition, fermentation dynamics, and functional metabolites of Indonesian fermented foods are still lacking, especially in relation to their health-promoting properties and safety profiles.

Despite their immense potential, traditional Indonesian fermented foods face serious threats from modernization and shifts in consumption patterns [14]. This creates an urgent need to document, preserve, and further study the diversity of local fermentation techniques and the associated microbiota. Research on traditional Indonesian fermentation microbes, particularly their health benefits, remains relatively limited compared to similar studies in other countries [5]. Through this review, we aim to systematically explore the richness of Indonesian fermented foods by highlighting their historical origins, raw materials, fermentation techniques, key microorganisms involved, as well as their nutritional and health benefits. Additionally, this review seeks to bridge traditional knowledge with scientific perspectives, identify research gaps, and promote the preservation and global recognition of Indonesia's diverse culinary heritage.

2. Objects and methods

This article was compiled using a descriptive literature review approach to explore the diversity of Indonesian fermented foods from the aspects of preservation, nutritional content, and health benefits. This review is based on a comprehensive literature synthesis conducted on



leading journal platforms such as Google Scholar, PubMed, ScienceDirect, and Scopus. The inclusion criteria for selecting reference sources include:

- ❑ Articles are primary research or review articles that have been indexed.
- ❑ Focus on Indonesian fermented food products or similar foods from other countries that are biologically and culturally relevant.
- ❑ Articles containing discussions on preservation mechanisms, nutritional value, and potential health benefits.
- ❑ Articles published within the last 10 years (2014–2024) to ensure data currency.

Selected articles were descriptively analyzed to identify patterns, trends, and scientific contributions to the understanding of the role of fermented foods in food systems and public health. The search was not limited to studies originating from Indonesia but also included relevant international literature that supports and explains the potential of Indonesian fermented foods in a global context.

3. Indonesian food fermentation and the manufacturing process

3.1. Tapai Singkong and Peuyeum

Indonesia is a nation known for the cultivation of root crops, such as potatoes, taro, sweet potatoes, and cassava [15]. Cassava (*Manihot esculenta*) is extensively subjected to fermentation using yeast (*Saccharomyces cerevisiae*), resulting in the production of tapai singkong and peuyeum. These traditional fermented delicacies have obtained considerable popularity after tempeh [16]. Tapai Singkong is available across various regions of Indonesia, while peuyeum is a distinctive specialty of Bandung. In general, peuyeum serves as a souvenir representing Bandung for tourists and is also a staple in the daily diet of the local community [3].

Tapai singkong and peuyeum are traditional fermented products made from cassava with notable similarities, yet distinct production methods and textures. Tapai singkong is prepared by peeling, washing, and steaming cassava until partially cooked, followed by inoculation with a small amount of yeast and fermentation for approximately 72 hours under semi-anaerobic conditions, resulting in a soft texture [17]. In contrast, peuyeum involves peeling and half-boiling the cassava, then fermenting it with a higher yeast concentration under anaerobic conditions for the same duration, producing a firmer texture [16,18].

Typically, peuyeum retains the shape of the whole cassava and exhibits a yellowish-white coloration [3], as seen in Figure 2. Furthermore, peuyeum can be processed into various derivative products, including colenak (grilled fermented cassava served with coconut sugar sauce), fried peuyeum, fermented cassava cakes, and mixed ice desserts, all of which are widely consumed across Indonesia [15]. The taste of fermented tapai singkong and peuyeum becomes sour due to the metabolic processes of yeast and bacteria during fermentation [19]. During fermentation, glucose is converted into ethanol and carbon dioxide by yeast. Simultaneously, bacteria convert some of the alcohol into organic acids such as acetic acid, contributing to the sour taste [20]. The packaging of tapai singkong or peuyeum during fermentation can also affect the taste. Tapai singkong wrapped in plastic will taste sourer, while tapai singkong wrapped in banana leaves will taste sweeter due to the natural properties of banana leaves [21].

3.2. Brem

Solid brem is a traditional fermented product made from glutinous rice, originating from Madiun and Wonogiri (Figure 3) [22]. It is produced from glutinous rice extract and is characterized by a sweet-sour taste and a floury texture, commonly consumed as a snack. Solid brem is available in two color variants: solid white and yellowish-white [23]. The fermentation process involves the presence of fungi such as *Saccharomycopsis fibuligera* and *Wickerhamomyces anomalus* [24].



Figure 2. Peuyeum, a fermented cassava from West Java
Рисунок 2. Пейеум — ферментированная кассава с Западной Явы



Figure 3. Brem, a traditional fermented food originating from Madiun
Рисунок 3. Брем — традиционный ферментированный пищевой продукт, происходящий из Маджуна



Figure 4. Terasi as a spice and culinary accompaniment in Indonesia
Рисунок 4. Тераси как специя и кулинарное дополнение в Индонезии

In addition to the solid form, liquid brem is another traditional fermented glutinous rice product, commonly found in Bali. It remains widely known and produced, playing an important cultural role in religious ceremonies and traditional medicine [25]. Liquid brem is made by fermenting steamed glutinous rice sprinkled with tape yeast (*ragi tape*) for five days at room temperature (27 °C), producing fermented rice known as tape. The tape is then pressed to extract the juice, which is subsequently fermented for six months in a sealed container or fermentation tank [26].

3.3. Terasi

Terasi is a fermented food product commonly used as a spice and culinary accompaniment in Indonesia. This condiment has its origins in the island of Java and is primarily crafted from a mixture of shrimp and fish, typically presented in a paste-like form, as seen in Figure 4. The effectiveness as a flavor enhancer can be attributed to the substantial glutamate content. Across numerous Asian countries, this food is used as a seasoning agent in cooking, as evidenced by the various regional names and utilization. Some of the countries where terasi is consumed and referred to by distinct names include Thailand (*kapi*), Cambodia (*Belacan*), Malaysia (*Mamrouc*), Brunei (*Mamtom*), Myanmar (*Ngapi*), China (*Shajiang*), and Korea (*Saewoojeot*) [27].

Terasi, or shrimp paste, is produced from fundamental components including shrimp (*Acetes japonicus*), sugar, salt, and water [28]. The preparation includes boiling raw or planktonic prawns in water for approximately 5 minutes. These boiled shrimps are drained before adding 15% salt (comprising 15 grams of salt per 100 grams of shrimp) and the fermentation process is executed in two phases. The initial step includes fermenting the salted shrimp within a sealed container for a period of two days at approximately 25 °C. Subsequently, the shrimp paste is blended using a blender and manually formed into flat balls measuring 8–10 centimeters in diameter, resembling pasta. To reduce water content, the paste is subjected to a drying process in an oven for 4 hours at 50 °C. The phase comprises a second round of fermentation, with the paste left to ferment for a duration of 1–3 months [29]. Terasi shows a solid, paste-like consistency with a coarse texture and a moderately strong aroma [27].

3.4. Tauco (Taoetjo)

Taucu is a traditional Chinese food introduced to Indonesia many centuries ago. This food gained prominence in Cianjur, West Java Province, and subsequently spread across the coastal regions [30]. In Indonesia, taucu has been widely used as a culinary spice due to its delightful umami or savory flavor. The fundamental ingredient for producing taucu is soybean seeds (*Glycine max*) (Figure 5). Taucu comes in three distinct forms, namely solid, semi-solid, and liquid with varying moisture content. The nutritional content of 100 grams of taucu is presented in Table 1. These soybean seeds are boiled, mashed, blended with wheat flour, and subjected to fermentation. The fermented taucu is immersed in a saltwater solution and exposed to the sun's heat for several weeks before developing a distinctive aroma [31].

The fermentation process includes the growth of fungi and/or bacteria, lasting for a period of 3–6 days, with the assistance of the addition of *Aspergillus oryzae* or *Aspergillus sojae*. During this fermentation, various enzymes are generated, namely protease, amylase, and lipase [31]. The proteolytic enzymes produced by *A. oryzae* can hydrolyze soybean proteins into smaller peptides and free amino acids. This hydrolysis process is crucial for the development of the characteristic umami flavor in taucu, particularly through the release of glutamic acid, which provides a savory taste [32, 33]. In addition to producing proteolytic enzymes, *A. oryzae* also produces amylolytic enzymes that function to hydrolyze soybean starch into simple sugars. This hydrolysis process not only enhances the product's flavor but also increases nutrient availability and digestibility of the final product [34].

3.5. Oncom

Oncom is a traditional Indonesian fermented food originating from West Java [35]. It is primarily produced using agricultural by-products such as tofu dregs, cassava fiber (onggok) and groundnut cake (Figure 6). For decades, oncom has served as a valuable source of affordable nutrition due to its unique flavor and meat-like texture [36]. Oncom is available in two main varieties: red oncom (oncom merah), fermented using *Neurospora sitophila*, and black oncom (oncom hitam), fermented with *Rhizopus microsporus* var. *oligosporus* [37]. The production process involves soaking tofu dregs, groundnut cake and cassava fiber (onggok) for 3–4 hours and 1 hour, respectively. These components are then combined, molded into thin layers, and boiled for 1 hour. After cooling, the mixture is inoculated with oncom starter culture and placed into bamboo containers lined with banana leaves. Fermentation occurs at ambient temperatures (25–30°C) over 36–48 hours [37]. Nutritional profiles of red and black oncom are detailed in Table 1.

R. oligosporus plays a functional role by producing α -galactosidase, an enzyme that degrades gas-producing oligosaccharides in legumes, thereby reducing the risk of flatulence. Moreover, fungi used in the fermentation of oncom and tempeh have been shown to suppress the growth of aflatoxin-producing molds such as *Aspergillus flavus* [38]. Fermentation with *R. oligosporus* also enhances the protein content of oncom and significantly reduces antinutritional compounds such as phytates by 34–58% [39]. In Indonesia, oncom is classified into four quality grades based on the raw materials used in production [40]: 1) super-class oncom — the highest quality, often sold in supermarkets or designated for export. 2) first-class oncom — slightly lower in quality but still considered premium, commonly found in local markets (Figure 6). 3) second-class oncom — a widely consumed variety, typically sold in traditional markets. 4) third-class oncom — the lowest grade, generally used as an ingredient in seasoning blends or cooking spices [39].

3.6. Dadih

Dadih is a traditional yogurt made from buffalo milk, fermented inside bamboo containers sealed with plastic or banana leaves, as seen in Figure 7. This time-honored practice has been carried out by the Minangkabau people of West Sumatra, for centuries. The resulting fermented product is similar to yogurt, featuring a smooth and glossy texture, creamy color, pleasant aroma, and a tangy [40]. Buffalo milk is subjected to a natural fermentation process within bamboo containers at ambient temperatures of 25–30°C for approximately 3 days [41,42]. Analysis has shown that dadih contains approximately 82.10% water, 8.08% fat,

6.99% protein, and 5.29% lactose, as well as 13 essential amino acids, 3 non-essential amino acids, and 70 IU/gram of vitamin A [43].

Traditional dadih fermentation involves a complex interplay of various microorganisms. These microorganisms, thought to originate from the inner bamboo surface, covering leaves, and the milk itself [44], play a crucial role in the fermentation process. The fermentation of carbohydrates, influenced by proteolytic and lipid metabolism, significantly contributes to the development of structure and flavor of dadih. Carbohydrate metabolism is inextricably linked to the enzymatic activity of lactic acid bacteria can facilitate the conversion of lactose into lactic acid via the β -galactosidase pathway and lactic acid fermentation [45].

3.7. Kecap Manis

Soy sauce is a fermented product widely utilized as a flavoring agent. A distinctive characteristic of Indonesian soy sauce (Figure 8), differentiating it from those in other countries, is the prevalence of sweet soy sauce [46]. Soybeans serve as the primary ingredient in soy sauce production and possess a notably high protein content [47].

There are two types of fermentation methods used in the production of soy sauce, namely liquid and solid fermentation, also known as moromi and koji/tempeh fermentation. Solid fermentation typically takes 3–5 days; the outcome is referred to as “koji/tempeh” and “tempeh” when *Aspergillus* sp. and *Rhizopus* sp. are used as the fermenting agent. Conversely, moromi fermentation spans a period of 14–28 days and in this process, the koji/tempeh is dried before soaking in a 20–30% saltwater solution.

A. oryzae is a fungal species commonly used in soy sauce fermentation, particularly in the production of koji. During koji fermentation, the biochemical transformation facilitated by *A. oryzae* includes the breakdown of complexes such as protein, lipid, and carbohydrate hydrolysis [48]. Various essential enzymes are produced by *A. oryzae* during the fermentation process. Starch broken down into simple sugars by amylase enzymes serves as an energy source for the fermentation process. The umami flavor produced in soy sauce fermentation is generated by amino acids derived from proteins hydrolyzed by protease enzymes [49]. The overall final flavor profile of soy sauce is influenced by the micromolecules formed during fermentation.

3.8. Tape Ketan

Tape ketan is a fermented food made from glutinous or sticky rice, subjected to fermentation using *S. cerevisiae* [50]. The food product has a soft texture with a high moisture content and a sweet taste [51], as seen in Figure 9. Moreover, sticky rice tape is a commonly consumed food in Indonesia and the traditional method of preparation includes several



Figure 5. Tauco from Cianjur is available for sale in grocery stores

Рисунок 5. Тауко из Чианджур продается в бакалейных магазинах



Figure 7. Dadih is a traditional yogurt made by fermenting buffalo milk inside bamboo containers, which are covered with plastic

Рисунок 7. Дадих — традиционный йогурт, изготавливаемый путём ферментации молока буйволов внутри бамбуковых ёмкостей, которые покрываются пластиком



Figure 8. Soy sauce is fermented by *Aspergillus* sp.

Рисунок 8. Соевый соус, ферментированный *Aspergillus* sp.



Figure 6. Red oncom is produced using groundnut cake

Рисунок 6. Красный онком изготавливается, используя арахисовый жмых



Figure 9. Black Tape Ketan without banana leaf wrapping

Рисунок 9. Чёрный тапе кетан без обертывания банановыми листьями

steps. Sticky rice is cleaned to remove its husk, weighed to about 0.5 kg, and steamed for 2 hours using 2 liters of distilled water. After 2 hours, the steamed sticky rice is allowed to cool until the temperature reaches 25 °C. The rice is mixed with yeast and stirred until the content is evenly distributed. Subsequently, it is wrapped in banana leaves and left to ferment for 48–72 hours [52].

During tape fermentation, microorganisms metabolize the nutrient compounds in glutinous rice. Yeast hydrolyzes starch into simple sugars, which are then fermented to produce alcohol and the characteristic aroma of tape [53]. Tape Ketan is served as a dessert, offering a sweet taste with sour organoleptic characteristics and having a moderate alcohol content [14]. Tapai ketan contained 0.51–0.67% alcohol with 0.5–1.5% *S. cerevisiae* [54]. The nutritional compound content in sticky rice tape is shown in Table 1. Black Tape Ketan (sticky rice) contains a high level of anthocyanins, which offer health benefits such as reducing the risk of colon cancer. Anthocyanins also possess the capability to inhibit the damage caused by free radicals, including cancer cells [55].

3.9. Acar

Acar pickles are preserved foods made from vegetables or fruits, including cucumbers, carrots, chili, and onions, combined with salt and vinegar, as seen in Figure 10. Additionally, sugar or other spices can be added for seasoning [56]. Acar pickles are a well-known accompaniment in Indonesian cuisine, often served with dishes like satay, fried noodles or rice, and soto. To prepare this food product, carrots, cucumbers, chili, and onions are cut into uniform sizes and placed in a jar. A brine is prepared by boiling a mixture of water, vinegar, sugar, and salt. In addition, the hot brine is poured into the jar, which is left open for 1 hour. The jar is sealed and refrigerated for three days to a week. The longer the marination period, the better the taste [57].



Figure 10. Acar, a mixture of cucumber, carrot, chili, onion and brine solution

Рисунок 10. Акар — смесь огурцов, моркови, чили, лука и рассола

4. Role of fungi in Indonesian fermented food

Fermentative microorganisms offer a unique approach to food stability through physical and biochemical changes in fermented foods [8]. One important group of microorganisms involved is fungi. During fermentation, fungi interact with other microorganisms, such as bacteria and yeasts, through nutrient competition, the production of antimicrobial compounds, and facilitating the growth of specific microbes. This complex interaction directly influences the characteristics of the final product, particularly in terms of taste and texture [58]. The activity of antimicrobial compounds ensures food safety by preventing spoilage and inhibiting the growth of harmful pathogens [59]. For example, certain fungal species produce secondary metabolites, such as organic acids and antibiotics, which contribute to the safety and durability of fermented products. This role becomes particularly significant in traditional fermentation practices [60].

Beyond their contribution to food preservation, fungi also offer substantial benefits in food biotechnology through their rich nutritional profile. This advantage contributes to cost efficiency in the food industry, enabling the production of high-quality foods on a large scale at lower costs [61]. Furthermore, fungi play a role in breaking down complex carbohydrates, proteins, and fats during the fermentation process, thereby improving digestibility and nutrient bioavailability [62]. The fermentation of soybeans into tempeh, *R. oligosporus* not only develops the characteristic texture and organoleptic profile, but fermentation also contributes to facilitating product bio-enrichment through increased biosynthesis of vitamin B, including folic acid, nicotinamide, niacin, pyridoxine, and riboflavin [63]. In addition to improving nutritional value, the microorganisms involved in fermentation also contribute to the degradation of antinutritional factors commonly found in food ingredients. This degradation process eliminates the toxic properties of these compounds and enhances food safety, making previously fewer consumable substrates safe for consumption [14]. This highlights the crucial role of these microorganisms in improving both nutrition and food safety. The role of various fungal species in Indonesian fermented foods is summarized in Table 1.

5. Characterization of Lactic Acid Bacteria: Microbial diversity and functional role in health

Lactic acid bacteria are microbes composed of a thick layer of peptidoglycan, and are therefore classified as gram-positive bacteria. This heterogeneous group of microorganisms includes various major genera such as *Lactobacillus*, *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Leuconostoc*, and *Enterococcus* [71]. The diversity of LAB encompasses differences in acid tolerance, substrate preferences, and the ability to produce bioactive metabolites, enabling them to adapt to various fermented food matrices, ranging from dairy products to fermented vegetables. Each LAB species possesses specific functional characteristics, such as the production of antimicrobial compounds, enhancement of nutritional value, and contributions to the sensory characteristics of fermented products [72]. This variation forms the basis for selecting LAB strains for applications in the food and health industries.

Fermented foods containing LAB offer significant health benefits. This is due to the presence of probiotics that help maintain gut flora balance, as well as bioactive compounds produced during fermentation, which have various positive effects on overall health [73]. The consumption of fermented foods can enhance the diversity and functionality of gut microbiota. LAB, abundant in foods such as yogurt and kefir, play a crucial role in maintaining microbial balance in the gut, thereby supporting digestive health [74]. Additionally, LAB are known to alleviate symptoms of gastrointestinal disorders, including irritable bowel syndrome (IBS) and diarrhea, by normalizing intestinal function and reducing inflammation [75].

Lactic acid bacteria produce exopolysaccharides (EPS), which are metabolic compounds that play a crucial role in human health [76]. EPS isolated from fermented milk by *Lactobacillus helveticus* LZ-R-5 successfully identified R-5-EPS as a heteropolysaccharide with a molecular weight of approximately 5.41×10^5 Daltons. R-5-EPS exhibits potent immunostimulatory activity at the cellular level, as evidenced by increased proliferation of RAW264.7 macrophage cells, enhanced phagocytic activity, and elevated production of acid phosphatase, nitric oxide, and various cytokines [77]. These findings underscore the potential of R-5-EPS as a promising immunomodulatory agent. In addition to immunomodulatory activity, EPS demonstrates antiproliferative effects against various tumor cell types, including those derived from the intestine, liver, and breast. The mechanisms involved include the induction of apoptosis, cell cycle arrest, and antimutagenic, antioxidant, antiangiogenic, and anti-inflammatory properties [78]. At the genetic level, the structure of EPS synthesized by LAB is highly diverse, primarily influenced by glycosyltransferase genes that determine monosaccharide composition. EPS synthesis occurs via both extracellular pathways and Wzx/Wzy protein-dependent pathways [79].

Table 1. The role of fungi in Indonesian fermented foods

Таблица 1. Роль грибов в индонезийских ферментированных продуктах

Fungi	Indonesian fermented food	Role	References
<i>S. cerevisiae</i>	Tapai Singkong, Peuyeum, and Tape Ketan	convert sugars into alcohol and carbon dioxide; give a characteristic sweet and slightly alcoholic flavor	[64]
<i>S. fibuligera</i> and <i>W. anomalus</i>	Brem	hydrolyze starch into sugars; produce ethanol and amylase; provides a unique flavor	[65]
<i>A. oryzae</i> , <i>A. sojae</i>	Tauco (Taoetjo)	produce enzymes that break down proteins and carbohydrates, resulting in a unique flavor and texture	[66,67]
<i>N. sitophila</i> and <i>R. microsporus</i> var. <i>oligosporus</i>	Oncom	break down complex carbohydrates in the soybeans, making them more digestible and increasing their protein content	[68]
<i>Aspergillus</i> sp. and <i>Rhizopus</i> sp	Kecap manis	produce enzymes that break down proteins and carbohydrates, resulting in a unique flavor and texture	[69,70]

The diverse health benefits of EPS are evident from studies on various LAB strains. Among 48 strains screened for high EPS production, *Lactiplantibacillus plantarum* MY04 exhibited the highest yield (1.15 g/L) [79].

In addition to high EPS production, MY04 shows good resistance to harsh digestive conditions, strong antibacterial activity, and high intestinal adhesion capacity. Comprehensive genomic analysis confirms the safety of MY04 for human consumption, as it lacks virulence factors and antibiotic resistance genes, making it a promising probiotic candidate for the development of functional food products [80]. EPS produced by *Limosilactobacillus fermentum* NCDC400 (EPS400) has also been shown to significantly reduce cholesterol levels. In vitro, EPS400 removes more than 90% of cholesterol from the test medium and reduces cholesterol availability under digestive conditions. In vivo studies on hypercholesterolemic rats emphasizes that EPS400 administration can optimize lipid regulation by effectively lowering cholesterol. These findings demonstrate the potential of EPS400 as a candidate hypocholesterolemic agent in the food and pharmaceutical sectors [81]. Furthermore, EPS produced by LAB such as *Leuconostoc mesenteroides*, commonly found in fermented foods, acts as a prebiotic. This EPS is indigestible by the human body but serves as a substrate for beneficial gut bacteria. Fermentation of EPS by gut microbiota produces short-chain fatty acids (SCFAs), which function as bioactive molecules involved as metabolic regulators of glucose elevation and energy homeostasis stability. Consumption of EPS can also modulate gut microbial composition toward a more balanced state, thereby supporting overall health. Understanding the critical role of EPS produced by LAB provides new insights into the formulation of management and therapeutic strategies for diabetes and obesity, diseases frequently associated with lifestyle, through the optimization of functional foods [82]. Research on the role of commensal gut bacteria identifies *Streptococcus salivarius* as a unique bacterium with the potential to prevent obesity caused by excessive sucrose consumption. This bacterium produces high levels of EPS from sucrose, and its abundance is significantly lower in obese individuals. Additionally, the metabolism of EPS into SCFAs is impaired in obesity cases. These findings reveal an important mechanism in the interaction between the host and commensal bacteria via EPS-SCFA carbohydrate metabolism that affects energy regulation. They also suggest novel therapeutic potentials by targeting specific bacteria and EPS metabolites through prebiotics and probiotics for the prevention of lifestyle-related diseases [83].

LAB also contribute to strengthening the immune response by stimulating antibody production and modulating inflammatory pathways. These interactions help the body combat infections and potentially reduce the risk of autoimmune diseases [84]. Furthermore, the fermentation process carried out by LAB enhances the bioavailability of nutrients, facilitating the absorption of essential vitamins and minerals. Fermentation also produces beneficial compounds such as short-chain fatty acids (SCFAs), which contribute to metabolic health [85]. LAB in fermented foods interact intricately with the human immune system, offering vari-

ous potential health benefits, including immunoregulation and disease prevention [86]. LAB and their fermented products play a role in regulating both innate and adaptive immune responses, potentially aiding in the management of inflammatory diseases [87]. In addition to maintaining gut microbiota balance, LAB contribute to optimizing digestion, nutrient absorption, and immune system function [88]. LAB modulate the functions of various immune cell types, including dendritic cells, macrophages, and regulatory T cells [89].

Beyond Lactic acid bacteria not only contribute positively to health, but the active metabolites produced during fermentation, such as antibacterial agents, lactic acid, and antifungal agents, can also improve food safety. In some fermentations, acetic acid is also produced, primarily by acetic acid bacteria (AAB), which alongside LAB contribute to inhibiting the growth of pathogenic microorganisms, preserving freshness, and extending the shelf life of food products [90]. However, like other food products, fermented foods face challenges related to safety. A deep understanding of the fermentation process and the microbial activity involved is essential to prevent health risks. Maintaining a balance of beneficial microorganisms during fermentation is key to ensuring product safety [75]. Suboptimal fermentation conditions, caused by poor hygiene practices or failure to control temperature, can hinder the dominance of beneficial microbes and lead to contamination by harmful bacteria, fungi, or toxins [91]. If fermentation practices are not properly controlled, there is a risk of pathogenic bacteria growth, such as *Salmonella spp.*, *Escherichia coli*, and *Listeria monocytogenes* [92]. Therefore, the implementation of Good Manufacturing Practices (GMP) and Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP) principles is essential in the production of fermented foods.

From a nutritional perspective, fermentation by LAB, particularly from the *Lactobacillus* genus, can enhance nutrient availability through the production of enzymes such as amylase, protease, lipase, and glucoamylase. These enzymes act during fermentation to break down complex substrates, facilitating improved nutrient absorption. Additionally, *Lactobacillus* plays a role in breaking down phytic acid, an antinutritional compound that inhibits mineral absorption [73]. Fermented foods containing *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains are known to contain various B-complex vitamins essential for body metabolism. LAB strains also exhibit metabolic activity that induces sensory changes in fermented foods, such as improved taste, aroma, and color, through the breakdown of organic compounds in the food matrix [93]. For example, the fermentation of cauliflower using *Lactobacillus plantarum* has been shown to increase protein content by 2.7%, from 10.4% to 13.1% after fermentation [94]. Additionally, the fermentation of temu giring rhizomes with *Lactobacillus bulgaricus* demonstrated an increase in phenolic and flavonoid compounds, as well as high antioxidant activity, with an IC50 value of 3.49 ppm [95]. Overall, the diversity and functional characteristics of lactic acid bacteria provide a spectrum of health benefits, making them relevant for use as a key component to improve community nutrition and disease prevention, as seen at Table 2.

Table 2. The contribution and health benefits of lactic acid bacteria in Indonesian fermented foods
Таблица 2. Роль и польза для здоровья молочнокислых бактерий в индонезийских ферментированных продуктах

Indonesian Fermented Food	Lactic Acid Bacteria	Contribution and Health Benefits	References
Tapai singkong	<i>Pediococcus acidilactici</i> and <i>Weissella cibaria</i>	<i>P. acidilactici</i> enhances protein and antioxidant content, while <i>W. cibaria</i> produces EPS. Both contribute to improved gut health	[96–99]
Peuyeum	<i>Weissella sp.</i> , <i>Lactobacillus sp.</i> and <i>Lc. mesenteroides</i>	These bacteria have the biochemical pathways to produce various organic acids, including lactic acid, which contribute to the unique flavor and characteristics of peuyeum	[100]
Brem	<i>Lactobacillus sp.</i> , <i>Leuconostoc sp.</i> , <i>Pediococcus sp.</i> , and <i>Weissella sp.</i>	Contribute to the distinct sweet and sour flavor of brem	[101]
Shrimp paste (terasi)	<i>Tetragenococcus</i> , <i>Halococcus</i> , <i>Atopostipes</i> , <i>Alkalibacillus</i> , and <i>Alkalibacterium</i> , along with <i>Lactiplantibacillus plantarum</i>	These bacteria can break down proteins and lipids, influencing the taste and aroma of shrimp paste by generating volatile compounds such as amino acids, aldehydes, organic acids, fatty acids, amines, and peptides	[100,102]
Tauco	<i>Lactobacillus</i> genus	Creates a low-pH environment.	[103]
Oncom	<i>Lacticaseibacillus paracasei</i> and <i>L. plantarum</i>	Produce organic and amino acids, contributing to the umami taste	[104]
Dadiah	<i>Lactococcus sp.</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Lactobacillaceae</i> , <i>Bifidobacterium</i> , <i>Streptococcus sp.</i> , <i>Leuconostoc sp.</i> , <i>Limosilactobacillus fermentum</i> , <i>L. pentosus</i> , <i>P. pentosaceus</i> , <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>cremoris</i> , <i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i> , <i>L. plantarum</i> , <i>L. casei</i> , and <i>L. rhamnosus</i>	Generates metabolites which inhibit pathogenic bacteria, thus contributing to dadiah safety.	[41,42,105]
Kecap manis	<i>Hansenula sp.</i> , <i>Zygosaccharomyces sp.</i> , and <i>Lactobacillus sp.</i>	Produce protease enzymes that break down the proteins in soybeans into amino acids, resulting in the distinctive umami flavor of soy sauce.	[106]
Tape ketan	<i>L. mesenteroides</i> , <i>Liquorilactobacillus vini</i> , <i>W. paramesenteroides</i> , <i>P. pentosaceus</i> , <i>L. fermentum</i> , and <i>Apilactobacillus kunkeei</i>	Lactic acid bacteria contribute to the production of lactic acid through anaerobic glucose fermentation, which gives tape its characteristic sour taste	[107,108]
Acar pickles	<i>L. plantarum</i> , <i>L. mesenteroides</i> , and <i>L. citreum</i> ,	These bacteria can reduce the number of biogenic amines (BA) during fermentation. The total count of mesophilic aerobic bacteria and yeast-mold colonies in pickle samples containing <i>L. plantarum</i> appeared to be significantly reduced	[109,110]

Overall, the consumption of Indonesian fermented food can contribute to improved gut health, potentially supporting overall well-being and providing a range of health benefits. Integrating a variety of naturally fermented foods into a balanced diet may promote a healthy gut microbiota and enhance overall health.

6. Nutritional facts

Fermented foods are often rich in a variety of nutrients, depending on the ingredients used and the specific fermentation process. The nutritional composition of fermented foods can vary based on several factors, including the fermentation method, the raw materials, the duration of fermentation, and the specific types of microorganisms involved [59]. Additionally, fermentation frequently enhances the nutritional value of raw ingredients. The microorganisms involved produce enzymes that break down complex compounds into simpler, more easily digestible forms [111]. For instance, fermentation can increase the concentrations of certain vitamins, such as B vitamins, and improve the bioavailability of minerals. It can also reduce the levels of antinutritional factors naturally present in some foods, such as phytates in grains and legumes, thereby enhancing the absorption of essential nutrients [112]. Furthermore, the final nutritional profile of fermented foods is strongly influenced by the type of raw material used. Vegetable fermentation typically yields products rich in vitamins and antioxidants, whereas dairy fermentation results in foods with high protein content [113,114]. The combination of

different raw materials and variations in fermentation techniques produces a diverse range of products, each with unique nutritional characteristics, contributing to the wide array of potential health benefits associated with fermented food consumption. Common nutrients found in fermented foods are summarized in Table 3.

7. The influence of fermentation on food shelf life

Fermentation is a food preservation method that plays a significant role in enhancing nutritional quality, extending shelf life, and influencing food functionality. This process can enhance the flavor and aroma of fermented products [121]. However, the shelf life of fermented products varies greatly, depending on the product type, packaging method, and fermentation conditions. For example, some products have a relatively short shelf life of 2 to 4 days, influenced by the type of packaging and fermentation conditions. Packaging with banana leaves can extend the shelf life up to 4 days, while fermented foods in plastic packaging only lasts about 2–3 days [122]

Differences in shelf life were also observed in shrimp paste (terasi). Commercial shrimp paste generally exhibits a longer shelf life (6–12 months in sealed packaging and 1–3 months after opening in refrigeration) compared to homemade shrimp paste (1–2 weeks in refrigeration). Optimal storage and packaging conditions are crucial to extend the shelf life of both types of shrimp paste [123]. Other fermented products, such as taucu, also undergo changes during storage. Although initial micro-

Table 3. Nutritional information for fermented foods per 100 g

Таблица 3. Информация о пищевой ценности ферментированных пищевых продуктов на 100 г

Fermented foods	Nutrients	Number	References	Fermented foods	Nutrients	Number	References
Tapai Singkong	Energy (Kcal)	169	[115]	Red oncom (oncom merah)	Energy (Kcal)	97.70	[118]
	Carbohydrate (g)	40.20			Carbohydrate (g)	55.59	
	Protein (g)	1.40			Protein (g)	24.16	
	Fat (g)	0.30			Fat (%)	16.10	
	Calcium (mg)	21			Total sugar (%)	0.80	
	Phosphorous (mg)	34			Total titratable acidity (%)	0.15	
	Iron (mg)	0.80			Total soluble protein (%)	39.94	
	Vitamin C (mg)	9			pH	4.87	
Brem	Energy (Kcal)	249	[116]	Moisture (%)	80.56	[118]	
	Carbohydrate (g)	58		Ash (%)	4.14		
	Protein (g)	3.40		GABA (ppm)	136.92		
	Fat (g)	0.40		Carbohydrate (g)	16.55		
	Calcium (mg)	198		Protein (g)	40.60		
	Phosphorous (mg)	86		Fat (%)	40.47		
	Iron (mg)	2		Total sugar (%)	0.17		
	Total carotene (µg)	240		Total titratable acidity (%)	0.10		
Terasi	Thiamine (mg)	0.34	[115]	Total soluble protein (%)	32.97	[43]	
	Protein (%)	64.80		pH	5.8		
	Fat (%)	3.45		Moisture (%)	52.98		
	Ash (%)	1.40		Ash (%)	2.38		
	Water (%)	25.77		Water (%)	82.10		
Solid taucu	Carbohydrate (g)	54.7–65.2	[117]	Protein (%)	6.99	[119]	
	Protein (g)	9.72–11		Fat (%)	8.08		
	Fat (%)	6.98–23.4		Lactose (%)	5.29		
	Ash (%)	10.0–22.8		Vitamin A (IU/g)	70		
	NaCl (%)	7.18–16.9		Carbohydrate (g)	28.40		
	Total sugars (%)	11.9–27.0		Protein (g)	18.20		
	Total acids (%)	1.24–2.18		Lipid (g)	3.20		
	Total amino acids (%)	11.4–17.5		Ash (g)	1.50		
Liquid taucu	Carbohydrate (g)	8.47–56.5	[117]	Glucose (g)	0.39	[120]	
	Protein (g)	20.4–30.9		Lactic acid (g)	1.92		
	Fat (%)	1.30–18.9		Salt content (g)	17.04		
	Ash (%)	17.1–73.89		Moisture (g)	48.70		
	NaCl (%)	10.7–68.4		Energy (Kcal)	166		
	Total sugars (%)	29.95–44.5		Carbohydrate (g)	34.4		
	Total acids (%)	1.65–5.36		Protein (g)	3.8		
	Total amino acids (%)	14.1–24.6		Fat (%)	1.0		
GABA (ppm)	220.96	Fiber (g)	0.60				
				Ash (g)	0.10		
				Calcium (mg)	8		
				Phosphorus (mg)	106		
				Iron (mg)	1.6		
				Thiamine (mg)	0.40		

biological analysis indicated that the tauco met food safety requirements, storage at room temperature for 12 days resulted in an increase in total microbial counts, molds, yeasts, and coliforms above permissible limits. However, the pH value of the tauco chili sauce tended to remain stable throughout the testing period [124]. The shelf life of kecap manis using Accelerated Shelf-Life Testing, revealing a shelf life of 127.92 days or 4.26 months at a temperature of 25 °C [125]. Meanwhile, sterilized black glutinous rice tape exhibits a shelf life influenced by storage temperature. Higher storage temperatures correlate with shorter shelf lives. At room temperature (25 °C), sterilized black glutinous rice tape can last approximately 1 year and 9 months [125]. Oncom, another fermented product, has a very short shelf life of about 1–2 days at room temperature [126]. This indicates that oncom is highly susceptible to spoilage due to physical, chemical, enzymatic, or microbiological changes. Consequently, the shelf life of fermented products varies widely, depending on product type, packaging methods, and fermentation conditions. Some products, such as cassava tape and oncom, have very short shelf lives, while others, like commercial shrimp paste and sterilized black glutinous rice tape, can last longer. Therefore, it is crucial to understand the factors affecting the shelf life of fermented products to implement proper storage and packaging practices that extend shelf life and maintain product quality.

8. Technological advancements to improve fermented food: Challenges and future prospects

Technological advancement aims to optimize fermentation processes, improve product consistency, diversify product offerings, enhance nutritional qualities and meet consumer demands for high-quality, innovative fermented food option. The following are some ways to improve product quality.

8.1. Strain selection and genetic engineering

The growth of the global population and the impacts of global warming necessitate an

increase in food production, storage, and transportation [127]. Modern biotechnology, including strain selection and genetic engineering, holds significant potential for expanding the scope of fermentation, creating novel foods, and enhancing the sustainability of food production [128]. Food fermentation has been practiced since antiquity, initially relying on indigenous microbiota and spontaneous fermentation, which later evolved into back-slopping and the utilization of starter cultures [129]. Specific strains of beneficial microorganisms, such as lactic acid bacteria and yeast, in fermented food can improve desirable flavors and textures, affecting sensory characteristics, extend shelf-life, prevent spoilage bacteria, and present health benefits [130,131]. With technological advancements, genetic engineering has reached a high level of precision, enabling modifications to virtually any aspect of the genome. Synthetic biology also offers new opportunities in addressing food production challenges [132].

Genetic modification techniques in beneficial microorganisms are being explored to enhance certain microbial strains used in fermentation. Strain improvement is typically reached by random mutagenesis, process optimization, control, increasing the yield, titer and cost-effectiveness [133]. This can potentially improve fermentation efficiency, resistance to environmental stressors, and production of specific compounds that contribute to the quality or nutritional value of the final product. Additionally, Indonesia has established regulations governing the hygiene and safety of genetic engineering product, as outlined in the Government Regulation of the Republic of Indonesia Number 21 of the Year 2005 and Regulation of the Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) Number 6 of the Year 2018. These regulations pertain to the control of genetically modified food products [134,135].

Additionally, there are constraints in applying genetic modifications to food systems [136]. Further challenges arise in handling non-model microorganisms, including the development of suitable molecular genetic tools [137]. Beyond the potential benefits, there are risks associated with the use of genetically modified microorganisms in food fermentation. The consumption of genetically engineered foods may lead to the development of antibiotic-resistant diseases. Another risk is the potential transfer of antibiotic and chemotherapy resistance genes into the body through fermentation products, potentially leading to multidrug-resistant strains that are difficult to treat [75]. Modern biotechnology offers significant opportunities to enhance food production and sustainability through fermentation. However, challenges such as technical constraints in handling non-model microorganisms and risks associated with genetically modified microorganisms need to be addressed to ensure the safety and sustainability of application of these technologies in food production. The Indonesian culture context, which is not yet familiar with genetically modified microorganisms, will pose a new challenge for Indonesia in the future.

8.2. Fermentation control systems and bioreactors

Advanced fermentation equipment and techniques allow for precise control of temperature, humidity, pH levels, and oxygen exposure during fermentation [138]. This control ensures the optimal condition for microbial growth and metabolic activities, assessing the progress of fermentation, resulting in more predictable, consistent, and higher-quality fermented products. Bioreactors provide controlled environments for fermentation on a larger scale. These systems help maintain optimal condition, leading to efficient and standardized production of fermented foods. Several factors affecting the bioreactor involve temperature and pH control, agitation and aeration, nutrient concentration, air pressure, contamination, size and design of bioreactor [139].

At an industrial scale, maintaining consistent heat and humidity levels presents a significant challenge due to the large volume of substrate involved. In solid-state fermentation (SSF), which relies on filamentous fungi, the delicate hyphae are highly susceptible to damage from mechanical agitation, posing a major constraint [140]. Therefore, maintaining optimal process conditions is crucial to achieving the desired yield and titer, regardless of the bioreactor configuration, the biocatalysts used, or potential process disruptions [141]. Ongoing research and innovation in biorefinery technology and product diversification play a vital role in unlocking the full potential of fermentation by-products. These advancements are also key to realizing the vision of a sustainable and circular bioeconomy [142]. One of the latest innovations in this field is the development of single-use bioreactors. These bioreactors are made from high-quality plastic materials such as low-density polyethylene, polypropylene, or polycarbonate. The use of single-use bioreactors eliminates the need for cleaning and sterilization between cultivation batches, reducing the risk of contamination while also simplifying validation processes and regulatory compliance [143]. Challenges in fermentation and bioreactor control include the difficulty of maintaining optimal conditions at an industrial scale and the vulnerability of fungal hyphae in SSF. Innovations such as single-use bioreactors provide solutions to minimize contamination risks and streamline processes. Further research and development in biorefinery technology and product diversification are essential to maximizing the potential of fermentation in achieving a sustainable bioeconomy.

8.3. Omics technologies

Harnessing synthetic biology for designing microorganisms with customized functions and traits enables the creation of novel fermented products. Genomics, transcriptomics, proteomics and metabolomics provide a comprehensive understanding of the microbial communities involved in fermentation processes. These technologies enable the identification and optimization of key microorganisms, genes, and metabolic pathway. The complexity of biological systems presents significant challenges in the application of omics technologies to fermented fruits and vegetables [144]. The vast amount of data generated by multi-omics technologies requires robust bioinformatics infrastructure and expertise [145]. Additionally, understanding the intricate and dynamic changes within microbial communities during spontaneous fermentation remains a major challenge [146]. The lack of comprehensive omics data repositories and universal databases further affects the accuracy of predictive models [144]. Nevertheless, the multi-omics approach provides in-depth insights into the dynamic microbial shifts occurring throughout food fermentation, surpassing single-cell omics analyses. This approach enables the exploration of the entire microbial community involved and facilitates the regulation of microbiota changes at each fermentation stage [145]. Omics technologies also play a crucial role in optimizing fermentation processes and improving product quality. For instance, multi-omics tools can be employed to evaluate the impact of various ingredients on fermentation dynamics and the resulting end products [129]. Despite the challenges associated with biological system complexity and the need for advanced bioinformatics infrastructure, multi-omics approaches hold great potential for understanding and optimizing food fermentation processes. These technologies offer profound insights into microbial changes and the key factors influencing the quality of fermented products. Therefore, continued research and development in this field are expected to enhance fermentation efficiency and improve the quality of fermented food products.

8.4. Improved packaging and storage

Innovations in packaging materials and techniques help maintain the quality and extend the shelf life of fermented foods by protecting them from oxygen, light, moisture, and microbial contamination. The storage duration and temperature can impact the bacterial survival. Therefore, enhancing packaging and storage conditions, considering environmental temperature, light exposure, oxygen levels, is crucial to significantly reduce the loss of viable bacteria [147].

Food safety threats and microbial spoilage risks are persistent challenges faced by the food industry. Storage duration and temperature significantly influence bacterial survival [148]. Environmental temperature manipulation can help mitigate the loss of viable bacteria. Another key strategy for enhancing microbial viability in food involves minimizing oxygen exposure through packaging modifications, incorporating antioxidant compounds, or controlling environmental light exposure [149]. Higher temperatures (37 °C) lead to the most significant reduction in microbial populations, while lower temperatures (-20 °C and 4 °C) are more effective in preserving microbial viability. Vacuum packaging primarily affects moisture retention, with vacuum-sealed packaging being superior in maintaining product moisture content. The optimal storage conditions for fermented products involve non-vacuum packaging and storage at freezing or refrigeration temperatures for no longer than three months [147]. The life cycle of fermented food packaging comprises several key phases, each with unique environmental considerations, including raw material extraction, manufacturing, distribution, consumer use, and end-of-life management, which encompasses byproducts and waste disposal. Sustainable practices, such as utilizing recyclable or compostable materials, optimizing packaging design, and minimizing energy consumption during manufacturing, are essential to reducing environmental impact and aligning with consumer preferences for eco-friendly options [150].

Maintaining optimal humidity levels is crucial for the quality and safety of fermented dairy products. Active packaging systems regulate humidity by either absorbing excess moisture or releasing it as needed. This humidity control helps prevent product deterioration, such as clumping caused by moisture or the growth of undesirable microorganisms [151]. Antimicrobial coatings integrated into the packaging materials provide an additional layer of protection against harmful microbes. Naturally derived antimicrobial compounds, such as those extracted from edible plant sources like anise, have been evaluated for their technical and economic feasibility in industrial-scale applications [152,153]. These coatings gradually release antimicrobial agents, inhibiting the growth of spoilage bacteria and pathogens that may compromise product quality and safety. This technology not only extends shelf life but also enhances the overall safety and quality of the product.

8.5. Fermentation in novel substrates

The substrate type, fermentation time and sugar type were the primary factors contributing to the significant increase in the content of bioactive compounds, which exhibit beneficial antioxidant properties. Researchers are exploring the use of alternative raw materials or substrates for fermentation to create new types of fermented foods. This includes exploring fermentation in plant-based products, grains, and unconventional sources to cater to diverse dietary preferences and meet specific nutritional needs [154].

Emerging fermentation techniques have attracted significant attention from researchers and the food industry due to their potential to integrate traditional foods into modern diets and to enable the fermentation of unconventional substrates and food by-products. Inoculation of *Lactocaseibacillus rhamnosus* on date palm substrate facilitates increased bioavailability of phenolic compounds [155]. The combination of non-traditional substrates with specific microbial strains can result in novel fermented foods with enhanced nutritional profiles and improved organoleptic properties [127]. The development of these new fermented products aims to promote better nutrition, sustainability, and health

benefits [156]. Innovations in this field include the utilization of agricultural by-products, biomass fermentation for protein production, the use of fruit seeds such as rambutan seeds, non-dairy substrates, and various plant parts such as roots and tubers [157].

8.6. Scale-up of traditional process

The enlargement of microbial processes is usually carried out with a commercial objective, particularly to deliver product advantages to consumers and to generate a financial profit for investors. Technologies and strategies for scaling up small-batch artisanal fermentation to larger production levels are being developed. Indonesian fermented foods are still predominantly produced by Micro, Small, and Medium Enterprises. This allows traditional fermented foods to be produced on a commercial scale while maintaining their unique characteristics. However, translating laboratory-scale advancements to large-scale production can pose challenges, including maintaining consistent condition and dealing with increased complexities [158].

Traditional fermented foods are significant sources of protein, vitamins, minerals, and other essential nutrients [159]. However, the limited application of modern biotechnology has hindered clinical exploration of their gut-modulating health functions [160]. Among the most under-explored categories of traditional foods are those originating from African and Asian countries, despite published data indicating their high nutritional value [161]. The modernization and commercialization of these products will ultimately determine their success as mainstream commodities in global markets. Key priorities will include ensuring safety, meeting hygiene standards, and preserving product-specific characteristics [162,163]. To commercialize traditional fermentation processes, industry stakeholders must address challenges related to safety and product consistency. Additional barriers include ethical and regulatory considerations, difficulties in applying research findings due to the high costs of effective methodologies, the expense of analyzing and interpreting high-dimensional data, and the issue of low reproducibility [164,165]. To bring precision-fermented products to market, companies must also navigate a complex and diverse regulatory landscape, including frameworks established by the FDA and EFSA in the United States and Europe, as well as national standards such as Indonesia's SNI [166,167].

9. Conclusion

This review elucidates the pivotal role of fermentation in preserving Indonesia's culinary heritage through traditional foods like tempeh, peuyeum, and kecap manis. Examining their origins, production methods, and the involvement of microorganisms, especially lactic acid bacteria, highlights their unique flavors and considerable nutritional benefits. The diverse production processes, raw material choices, and regional influences contribute to the distinct tastes in these fermented foods, enriching Indonesia's culinary landscape and revealing cultural nuances. Amid globalization, safeguarding these traditional fermentation methods is crucial to maintain culinary authenticity and cultural heritage. Preserving these practices not only protects them from extinction but also sustains cultural identity, fulfills nutritional needs, bolsters local economies, and promotes indigenous food resources for economic growth. Therefore, this study emphasizes the importance of cherishing Indonesia's diverse fermented foods. This not only preserves culinary traditions but also fosters cultural sustainability, celebrates culinary diversity, and supports overall well-being in the food industry's broader context.

REFERENCES

- Yunindanova, M. B. (2022). Preparing for Indonesian Agricultural Transformation in The Society Era 5.0. *Agrosains Jurnal Penelitian Agronomi*, 24(1), 32–36. <https://doi.org/10.20961/agsjpa.v24i1.59741>
- Nuraida, L. (2015). A review: Health promoting lactic acid bacteria in traditional Indonesian fermented foods. *Food Science and Human Wellness*, 4(2), 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2015.06.001>
- Agustina, I. H. (2020). Touristic and cultural perspectives on traditional food: Peuyeum Bandung. *International Journal of Innovation, Creativity and Change*, 14(12), 809–828.
- Adriani, Alang, H., Fatima, S., Ismarti, Pratiwi, E. R., Arifuddin, W. et al. (2023). Keamanan Pangan. CV Selebar Karya Pustaka, 2023. (In Indonesian)
- Fatmawati, E. (2021). Strategies to grow a proud attitude towards Indonesian cultural diversity. *Linguistics and Culture Review*, 5(S1), 810–820. <https://doi.org/10.21744/lingcure.v5nS1.1465>
- Wijaya, S. (2019). Indonesian food culture mapping: A starter contribution to promote Indonesian culinary tourism. *Journal of Ethnic Foods*, 6(1), Article 9. <https://doi.org/10.1186/s42779-019-0009-3>
- Dimidi, E., Cox, S. R., Rossi, M., Whelan, K. (2019). Fermented foods: Definitions and characteristics, impact on the gut microbiota and effects on gastrointestinal health and disease. *Nutrients*, 11(8), Article 1806. <https://doi.org/10.3390/nu11081806>
- Sharma, R., Garg, P., Kumar, P., Bhatia, S. K., Kulshrestha, S. (2020). Microbial fermentation and its role in quality improvement of fermented foods. *Fermentation*, 6(4), Article 106. <https://doi.org/10.3390/fermentation6040106>
- Liu, A., Xu, R., Zhang, S., Wang, Y., Hu, B., Ao, X. et al. (2022). Antifungal mechanisms and application of lactic acid bacteria in bakery products: A review. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 924398. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.924398>
- Haryani, Y., Halid, N. A., Guat, G. S., Nor-Khaizura, M. A. R., Hatta, A., Sabri, S. et al. (2023). Characterization, molecular identification, and antimicrobial activity of lactic acid bacteria isolated from selected fermented foods and beverages in Malaysia. *FEMS Microbiology Letters*, 370, Article fnad023. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnad023>
- Miranti, M., Iwahashi, H., Syaputri, Y. (2022). Antimicrobial activity of *Lactobacillus sakei* isolated from virgin coconut oil under pH and temperature stress. *Korean Journal of Food Preservation*, 29(6), 852–860. <https://doi.org/10.11002/kjfp.2022.29.6.852>
- Suwannaphan, S. (2021). Isolation, identification and potential probiotic characterization of lactic acid bacteria from Thai traditional fermented food. *AIMS Microbiology*, 7(4), 431–446. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2021026>
- Pandit, A., Darshane, P., Dixit, M. (2024). Role of fungi in revolutionizing the food sector. *Indian Journal of Nutrition*, 11(1), Article 290.

14. Tamang, J. P., Shin, D. -H., Jung, S. -J., Chae, S. -W. (2016). Functional properties of microorganisms in fermented foods. *Frontiers in Microbiology*, 7, Article 578. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00578>
15. Cempaka, L. (2021). Peuyeum: Fermented cassava from Bandung, West Java, Indonesia. *Journal of Ethnic Foods*, 8(1), Article 3. <https://doi.org/10.1186/s42779-021-00079-3>
16. Barus, T., Ufi, A. N., Tan, W. A., Ekowati, A. L., Yulandi, A. (2022). Bacterial community profiles in Tapai Singkong: A traditional Indonesian fermented food from Cassava Tubers. *Microbiology Indonesia*, 16(2), 1–7.
17. Hidayah, N., Basirun, B. (2021). The effect of packaging type to organoleptic properties of Cassava Tape. *Nutriology Jurnal: Pangan, Gizi, Kesehatan*, 2(1), 101–105. <https://doi.org/10.30812/nutriology.v2i1.1244>
18. Maryam, S., Damiati, Wiratini. (2024). Pemberdayaan masyarakat desa Panji Anom melalui pengolahan ubi kayu (*Manihot esculenta*) menjadi peuyeum. *Jurnal Inovasi Hasil Pengabdian Masyarakat*, 9, 1142–1149. [Maryam, S., Damiati, Wiratini. (2024). Community empowerment of Panji Anom village through cassava processing (*Manihot esculenta*) into peuyeum. *Jurnal Inovasi Hasil Pengabdian Masyarakat*, 9, 1142–1149. (In Indonesian)]
19. Devi, M., Wibowotomo, B., Ummu, N., Hidayati, L., Martiningtyas, A., Ariffin, H. F. (October 22, 2022). Effect of fermentation time on nutrient content and organoleptic quality of corn (*Zea mays L.*) Tapai as superfood. Proceedings of the 4th Annual Conference of Engineering and Implementation on Vocational Education, ACEIVE 2022. Medan, North Sumatra, Indonesia, 2023. <https://doi.org/10.4108/eai.20-10-2022.2328833>
20. SB, D. H., Inayah, I., Puspaningtyas, D. E., Sari, P. M., Kusuma, N. H. (2023). Diversity of traditional fermented foods: Sucrose and reducing sugar analysis of various fermented-cassava. RSF Conference Proceeding Series: Medical and Health Sciences, 2(1), 24–32. <https://doi.org/10.51098/cpmhs.v2i1.627>
21. Sulistyawati, S., Ulfah, M. (2024). Characteristics of tape with different packaging materials: A review. Proceeding International Seminar on Science and Technology, 3, 69–76. <https://doi.org/10.33850/issst.v3i1.2325>
22. Setyowati, Adi, R.K. (September 11, 2019). Marketing strategy of Brem in Wonogiri Regency. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The 5th International Seminar on Agribusiness 2019 "Agricultural Innovation for Sustainable Farming System" Semarang, Indonesia. 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/518/1/012068>
23. Soemarie, Y. B., Milanda, T., Barliana, M. I. (2021). Fermented foods as probiotics: A review. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology and Research*, 12(4), 335–339. https://doi.org/10.4103/japtr.japtr_116_21
24. Lenka, A. B., Astuti, R. I., Listiyowati, S. (2021). Yeasts isolated from traditional brem bali show stress tolerance phenotype against fermentation-related stresses. *Makara Journal of Science*, 25(1), Article 7. <https://doi.org/10.7454/mss.v25i1.1209>
25. Bryan, B., Duniaji, A. S., Wisaniyasa, N. W. (2021). Effect of comparison between white glutinous rice (*Oryza sativa glutinosa*) and purple sweet potato (*Ipomoea batatas L.*) on the characteristics of Brem beverages. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan*, 10(3), 525–535. <https://doi.org/10.24843/itepa.2021.v10.i03.p19> (In Indonesian)
26. Udin, J., Nurlaelah, I., Priyanto, A. (2020). Pengaruh kadar konsentrasi *Saccharomyces cerevisiae* terhadap sifat organoleptik dan sifat kimia (alkohol dan gula) pada Brem Cair *Ipomoea batatas L.* *Edubiologica: Jurnal Penelitian Ilmu dan Pendidikan Biologi*, 8(1), 25–34. [Udin, J., Nurlaelah, I., Priyanto, A. (2020). The effect of *Saccharomyces cerevisiae* concentration on organoleptic and chemical properties (alcohol and sugar) in liquid Brem *Ipomoea batatas L.* *Edubiologica: Jurnal Penelitian Ilmu dan Pendidikan Biologi*, 8(1), 25–34. (In Indonesian)] <https://doi.org/10.251534/edubiologica.v8i1.2982>
27. Prihanto, A. A., Muyasyaroh, H. (2021). The Indonesian fermented food product terasi: History and potential bioactivities. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 12(2), 378–384. <https://doi.org/10.31838/srp.2021.2.52>
28. Wulandari, F. C., Sari, H. N. A., Desrianty, N. A., Prihanto, A. A. (August 27–28, 2019). Effect of salt, sugar and water addition on consumer preferences of terasi. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 493, International Conference on Sustainable Aquatic Resources, Malang, Indonesia, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/493/1/012040>
29. Surya, R., Nugroho, D., Kamal, N., Tedjakusuma, F. (2023). Effects of fermentation time on chemical, microbiological, antioxidant, and organoleptic properties of Indonesian traditional shrimp paste, terasi. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 31, Article 100643. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100643>
30. Herlina, V. T., Setiarto, R. H. B. (2024). Terasi, exploring the Indonesian ethnic fermented shrimp paste. *Journal of Ethnic Foods*, 11(1), Article 7. <https://doi.org/10.1186/s42779-024-00222-w>
31. Daulay, R.A., Jannah, R., Yolanda, S.D., Karina, S.T., Annisa, G., Pulungan, N. A. (2023). Percobaan fermentasi kacang kedelai (*Glycine max (L.) Merril*) sebagai Taucu dengan berbagai jenis tepung di Medan. *Jurnal Pendidikan dan Konseling*, 5(1), 2244–2251. [Daulay, R.A., Jannah, R., Yolanda, S.D., Karina, S.T., Annisa, G., Pulungan, N. A. (2023). Soybean fermentation experiment (*Glycine max (L.) Merril*) as Taucu with various types of flour in Medan. *Jurnal Pendidikan dan Konseling*, 5(1), 2244–2251. (In Indonesian)] <https://doi.org/10.31004/jpdk.v5i1.11302>
32. Oktavia, A., Zainal, Djalal, M., Hidayat, S. H., Azkiyah, M. (October 25–26, 2023). Exploring the utilization of fungi in Indonesian traditional foods: A review. BIO Web of Conferences, Volume 96, The 2nd Unhas International Conference on Agricultural Technology (UICAT 2023), Indonesia, 2024. <http://doi.org/10.1051/bioconf/20249601025>
33. Roustana, N., Hellwig, C., Wainaina, S., Lukitawesa, L., Agnihotri, S., Roustana, K. et al. (2021). Filamentous fungus *Aspergillus oryzae* for food: From submerged cultivation to fungal burgers and their sensory evaluation – A pilot study. *Foods*, 10(11), Article 2774. <https://doi.org/10.3390/foods10112774>
34. Sun, Z., Wu, Y., Long, S., Feng, S., Jia, X., Hu, Y. et al. (2024). *Aspergillus oryzae* as a cell factory: Research and applications in industrial production. *Journal of Fungi*, 10(4), Article 248. <https://doi.org/10.3390/jof10040248>
35. Sath, P. K., Chawla, P., Duhan, J. S. (2018). Fermentation approach on phenolic, antioxidants and functional properties of peanut press cake. *Food Bioscience*, 22, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.01.011>
36. Wijaya, C. H., Nuraidia, L., Nuramalia, D. R., Hardanti, S., Świąder, K. (2024). Oncom: A nutritive functional fermented food made from food process solid residue. *Applied Sciences*, 14(22), Article 10702. <https://doi.org/10.3390/app142210702>
37. Mawardi, Sarjani, T. M., Fadilah. (2019). Penelitian pemanfaatan limbah ampas tahu sebagai produk pangan layak konsumsi di desa Meurandeh Dayah. *Jurnal Ilmiah Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(1), 40–44. [Mawardi, Sarjani, T. M., Fadilah. (2019). Training on utilization of tofu waste as a food product suitable for consumption in Meurandeh Dayah village. *Jurnal Ilmiah Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(1), 40–44. (In Indonesian)]
38. Mulyani, S., Wisma, R. W. (2016). Analisis proksimat dan sifat organoleptik "Oncom merah alternatif" dan "Oncom hitam alternatif". *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, 1(1), 41–51. [Mulyani, S., Wisma, R. W. (2016). Proximate analysis and organoleptic properties of "Alternative red Oncom" and "Alternative black Oncom". *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, 1(1), 41–51. (In Indonesian)] <https://doi.org/10.20961/jkpk.v1i1.39428>
39. Rohimah, A., Setiawan, B., Roosita, K., Palupi, E. (2021). The effects of soaking treatments and fermentation process on nutritional and aflatoxin contents of fermented peanut cake (Black oncom). *Polish Journal of Natural Sciences*, 36(1), 59–78. <https://doi.org/10.31648/pjns.7306>
40. Arnold, M., Rajagukguk, Y. V., Gramza-Michałowska, A. (2021). Characterization of Dadih: Traditional fermented buffalo milk of Minangkabau. *Beverages*, 7(3), Article 60. <https://doi.org/10.3390/beverages7030060>
41. Venema, K., Suroño, I. S. (2019). Microbiota composition of Dadih – a traditional fermented buffalo milk of West Sumatra. *Letters in Applied Microbiology*, 68(3), 234–240. <https://doi.org/10.1111/lam.13107>
42. Wirawati, C. U., Sudarwanto, M. B., Lukman, D. W., Wientarsih, I., Srihanto, E. A. (2019). Diversity of lactic acid bacteria in dadih produced by either back-slopping or spontaneous fermentation from two different regions of West Sumatra, Indonesia. *Veterinary World*, 12(6), 823–829. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2019.823-829>
43. Harahap, F. C., Ginting, N., Hamdan, H., Daulay, A. H., Hasnudi, H. (2018). Uji nutrisi dadih susu kerbau dan susu kambing dengan menggunakan bambu ampel (*Bambusa vulgaris*) dan bambu gombong (*Gigantochloa verticillata*). *Talent Conference Series: Agriculture and Natural Resources*, 1(2), 186–191. [Harahap, F. C., Ginting, N., Hamdan, H., Daulay, A. H., Hasnudi, H. (2018). Nutritional value test of cottage cheese from buffalo and goat milk using ampel bamboo (*Bambusa vulgaris*) and gombong bamboo (*Gigantochloa verticillata*). *Talent Conference Series: Agriculture and Natural Resources*, 1(2), 186–191. (In Indonesian)] <http://doi.org/10.32734/anr.v1i2.234>
44. Pinem, S., Damayanti, E. (2021). Kualitas dadih susu sapi dan susu kambing dengan fermenter tabung bambu. *Jurnal Jeumpa*, 7(1), 371–378. [Pinem, S., Damayanti, E. (2021). High-quality cottage cheese made from cow's and goat's milk with bamboo tube fermenter. *Jurnal Jeumpa*, 7(1), 371–378. (In Indonesian)] <https://doi.org/10.33059/jj.v7i1.3813>
45. Fatdillah, H., Febrianti, F., Sari, D.R. (2023). Pengaruh fermentasi spontan dan back-slopping terhadap kualitas dadih berdasarkan total bakteri asam laktat, pH dan total titratable acidity. *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Hewani*, 2(2), 69–81. [Fatdillah, H., Febrianti, F., Sari, D.R. (2023). The effect of spontaneous fermentation and reverse pressing on the quality of cottage cheese based on the total number of lactic acid bacteria, pH and total titratable acidity. *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Hewani*, 2(2), 69–81. (In Indonesian)] <https://doi.org/10.55606/jurrih.v2i2.2670>
46. Meutia, Y. R. (2016). Standardization of soy sauce sweet product as product specialty of Indonesia. *Jurnal Standarisasi*, 17(2), 147–156. <http://doi.org/10.31153/j.s.v17i2.314> (In Indonesian)
47. Santosa, B., Ismawati, I., Dewi, J. R. (2018). Characterization of soy sauce produced various beans types on physica and chemical properties. *Jurnal Pertanian Cemara*, 15(1), 40–47. <https://doi.org/10.24929/fp.v15i1.644> (In Indonesian)
48. Lusihamne, C.B., Andriana, M., Marena Kurnia Sari, F.M.K. (2023). The biochemistry and physical changes in koji fermentation by *aspergillus oryzae* in sweet soy sauce making. *Tropical Microbiome Journal*, 1(1), 35–46. (In Indonesian)
49. Ito, K., Matsuyama, A. (2021). Koji molds for Japanese soy sauce brewing: Characteristics and key enzymes. *Journal of Fungi*, 7(8), Article 658. <https://doi.org/10.3390/jof7080658>
50. Gres, M. R. (2023). Fermentasi Tapai Ketan Hitam (*Oryza sativa* Linn var *glutinosa*). *Jurnal Multidisipliner Bharasumba*, 2(03), 175–179. [Gres, M. R. (2023). Fermentation of black glutinous rice tapai (*Oryza sativa* Linn. var. *glutinosa*). *Jurnal Multidisipliner Bharasumba*, 2(03), 175–179. (In Indonesian)] <https://doi.org/10.62668/bharasumba.v2i03.707>
51. Khazalina, T. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* in making halal products based on conventional biotechnology and genetic engineering. *Jurnal Halal Product and Research*, 3(2), 88–94. <https://doi.org/10.20475/jhpr.vol.3-issue.2.88-94>
52. Supartingsih, S., Maimunah, S., Silalahi, Y. C. E. (2020). Amino acid levels enhancement test in black glutinous rice with pineapple juice addition using visible ray spectrophotometry method. *Jurnal Farmanesia*, 7(1), 37–44. <https://doi.org/10.51544/jf.v7i1.2764> (In Indonesian)
53. Wahyuningsih, E. A., Irmanda, L., Wisnu, Y., Aji, K., Hidayat, R., Anindita, N. S. (2023). Pengaruh lama fermentasi, penambahan ragi dan konsentrasi gula pada tape ketan. Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat LPPM Universitas 'Aisyiyah Yogyakarta, 2023. [Wahyuningsih, E. A., Irmanda, L., Wisnu, Y., Aji, K., Hidayat, R., Anindita, N. S. (2023). Effect of fermentation time, yeast addition and sugar concentration on sticky rice tape. Proceedings of the National Seminar on research and Community Service of LPPM Universitas 'Aisyiyah Yogyakarta, 2023. (In Indonesian)]
54. Berlian, Z., Aini, F., Ulandari, R. (2016). Uji kadar alkohol pada tapai ketan putih dan singkong melalui fermentasi dengan dosis ragi yang berbeda. *Jurnal Biota*, 2(1), 106–111. [Berlian, Z., Aini, F., Ulandari, R. (2016). Evaluation of the alcohol content of white sticky rice and cassava through fermentation with different yeast doses. *Jurnal Biota*, 2(1), 106–111. (In Indonesian)]
55. Sunarya, S.R., Wardani, S. W., Mulyo, G. P. E. (2021). Efektivitas pemberian snack tape ketan hitam terhadap frekuensi defekasi pada remaja putri. *Jurnal Riset Kesehatan Poltekkes Depkes Bandung*, 13(1), 283–293. [Sunarya, S.R., Wardani, S. W., Mulyo, G. P. E. (2021). The effectiveness of black sticky rice snack bar tape against the frequency of defecation in adolescent girls. *Jurnal Riset Kesehatan Poltekkes Depkes Bandung*, 13(1), 283–293. (In Indonesian)] <https://doi.org/10.34011/jurikesbdg.v13i1.1908>
56. Anggraeni, L., Lubis, N., Junaedi, E. C. (2021). Review: Effect of salt concentration on fermented vegetable products. *Jurnal Sains dan Kesehatan*, 3(6), 891–899. (In Indonesian) <https://doi.org/10.25026/jsk.v3i6.459>
57. Najmah, N. (2024). Produk Fermentasi Probiotik Acar Timun (Pickled Cucumber) Dengan Penambahan Sari Lemon Sebagai Pangan Fungsional. *Jurnal Normalita*, 12(2), 143–152. [Najmah, N. (2024). Probiotic fermented pickled cucumber

- products with the addition of lemon juice as a functional food. *Jurnal Normalita*, 12(2), 143–152. (In Indonesian)]
58. Polo, Q. (2023). Importance of filamentous fungi in regulation of food fermentation. *Journal of Food Microbiology, Safety and Hygiene*, 8(5), Article 236. <https://doi.org/10.35248/2476-2059.23.8.236>
 59. Voidarou, C., Antoniadou, M., Rozos, G., Tzora, A., Skoufos, I., Varzakas, T. et al. (2021). Fermentative foods: Microbiology, biochemistry, potential human health benefits and public health issues. *Foods*, 10(1), Article 69. <https://doi.org/10.3390/foods10010069>
 60. Son, S. Y., Lee, S., Singh, D., Lee, N.-R., Lee, D.-Y., Lee, C. H. (2018). Comprehensive secondary metabolite profiling toward delineating the solid and submerged-state fermentation of *Aspergillus oryzae* KCCM 12698. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 1076. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01076>
 61. Pouris, J., Kolyva, F., Bratakou, S., Vogiatzi, C. A., Chaniotis, D., Beloukas, A. (2024). The role of fungi in food production and processing. *Applied Sciences*, 14(12), Article 5046. <https://doi.org/10.3390/app14125046>
 62. Lübeck, M., Lübeck, P. S. (2022). Fungal cell factories for efficient and sustainable production of proteins and peptides. *Microorganisms*, 10(4), Article 753. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040753>
 63. Astuti, M. (2015). Health benefits of tempe. Chapter in a book: Health benefits of fermented foods and beverages. CRC Press, 2015.
 64. Bruner, J., Fox, G. (2020). Novel non-cerevisiae *Saccharomyces* yeast species used in beer and alcoholic beverage fermentations. *Fermentation*, 6(4), Article 116. <https://doi.org/10.3390/fermentation6040116>
 65. Methner, Y., Magalhães, F., Raihofer, L., Zarnkow, M., Jacob, F., Hutzler, M. (2022). Beer fermentation performance and sugar uptake of *Saccharomyces fibuliger* — A novel option for low-alcohol beer. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 1011155. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1011155>
 66. Pauzi, R. Y., Astuti, D. I. (2025). Exploring microbial succession in Indonesian fermented soybean paste (Tauco) through culture-dependent approach. *Microbiology and Biotechnology Letters*, 53(1), 57–67. <https://doi.org/10.48022/mbi.2411.11002>
 67. Mojsov, K. D. (2016). *Aspergillus* enzymes for food industries. Chapter in a book: New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering. Elsevier, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63505-1.00033-6>
 68. Wijaya, C. H., Nuraida, L., Nuramalia, D. R., Hardanti, S., Świąder, K. (2024). Oncom: A nutritive functional fermented food made from food process solid residue. *Applied Sciences*, 14(22), Article 10702. <https://doi.org/10.3390/app142210702>
 69. Humairoh, D. (2017). Identifikasi kapang pada kecap kedelai manis produksi lokal kediri dengan metode pengenceran. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 6(1), 11–20. [Humairoh, D. (2017). Determination of mold in locally produced sweet kediri soy sauce by dilution method. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 6(1), 11–20. (In Indonesian)] <https://doi.org/10.23887/jstundiksha.v6i1.9389>
 70. Vellozo-Echevarría, T., Barrett, K., Vuillemin, M., Meyer, A. S. (2024). Mini-review: The distinct carbohydrate active enzyme secretome of *Rhizopus* spp. represents fitness for mycelium remodeling and solid-state plant food fermentation. *ACS Omega*, 9(32), 34185–34195. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04378>
 71. Wuyts, S., Wittouck, S., De Boeck, I., Allonius, C. N., Pasolli, E., Segata, N. et al. (2017). Large-scale phylogenomics of the *Lactobacillus casei* group highlights taxonomic inconsistencies and reveals novel clade-associated features. *mSystems*, 2(4), Article e00061–17. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00061-17>
 72. Rodríguez, L. G. R., Mohamed, F., Bleckwedel, J., Medina, R., De Vuyst, L., Hebert, E. M. et al. (2019). Diversity and functional properties of lactic acid bacteria isolated from wild fruits and flowers present in northern Argentina. *Frontiers in Microbiology*, 10, Article 1091. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01091>
 73. Mathur, H., Beresford, T. P., Cotter, P. D. (2020). Health benefits of lactic acid bacteria (LAB) fermentates. *Nutrients*, 12(6), Article 1679. <https://doi.org/10.3390/nu12061679>
 74. Castellone, V., Bancalari, E., Rubert, J., Gatti, M., Neviani, E., Bottari, B. (2021). Eating fermented: Health benefits of LAB-fermented foods. *Foods*, 10(11), Article 2639. <https://doi.org/10.3390/foods10112639>
 75. Skowron, K., Budzyńska, A., Grudlewska-Buda, K., Wiktorczyk-Kapischke, N., Andrzejewska, M., Walecka-Zacharska, E. et al. (2022). Two faces of fermented foods — The benefits and threats of its consumption. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 845166. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.845166>
 76. Deepak, V., Ramachandran, S., Balahmar, R. M., Pandian, S. R. K., Sivasubramanian, S. D., Nellaiah, H. et al. (2016). In vitro evaluation of anticancer properties of exopolysaccharides from *Lactobacillus acidophilus* in colon cancer cell lines. *In Vitro Cellular and Developmental Biology — Animal*, 52(2), 163–173. <https://doi.org/10.1007/s11626-015-9970-3>
 77. You, X., Li, Z., Ma, K., Zhang, C., Chen, X., Wang, G. et al. (2020). Structural characterization and immunomodulatory activity of an exopolysaccharide produced by *Lactobacillus helveticus* LZ-R-5. *Carbohydrate Polymers*, 235, Article 115977. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115977>
 78. Wu, J., Zhang, Y., Ye, L., Wang, C. (2021). The anti-cancer effects and mechanisms of lactic acid bacteria exopolysaccharides in vitro: A review. *Carbohydrate Polymers*, 253, Article 117308. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117308>
 79. Zhang, J., Xiao, Y., Wang, H., Zhang, H., Chen, W., Lu, W. (2025). Lactic acid bacteria-derived exopolysaccharide: Formation, immunomodulatory ability, health effects, and structure-function relationship. *Microbiological Research*, 274, Article 127432. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127432>
 80. Lu, J., Mao, Y., Ma, T., Liu, X., Cheng, X., Bai, Y. et al. (2023). Screening and genome analysis of lactic acid bacteria with high exopolysaccharide production and good probiotic properties. *Food Bioscience*, 56, Article 103211. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103211>
 81. Gawande, K., Kolhekar, M., Kumari, M., Kapila, S., Sharma, P., Ali, S. A. et al. (2021). Lactic acid bacteria based purified exopolysaccharide showed viscofying and hypercholesterolemic capabilities. *Food Hydrocolloids for Health*, 1, Article 100042. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2021.100042>
 82. Miyamoto, J., Shimizu, H., Hisa, K., Matsuzaki, C., Inuki, S., Ando, Y. et al. (2023). Host metabolic benefits of prebiotic exopolysaccharides produced by *Leuconostoc mesenteroides*. *Gut Microbes*, 15(1), Article 2161271. <https://doi.org/10.1080/19490976.2022.2161271>
 83. Shimizu, H., Miyamoto, J., Hisa, K., Ohue-Kitano, R., Takada, H., Yamano, M. et al. (2025). Sucrose-preferring gut microbes prevent host obesity by producing exopolysaccharides. *Nature Communications*, 16(1), Article 1145. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56470-0>
 84. Vera-Santander, V. E., Hernández-Figueroa, R. H., Jiménez-Munguía, M. T., Mani-López, E., López-Malo, A. (2023). Health benefits of consuming foods with bacterial probiotics, postbiotics, and their metabolites: A review. *Molecules*, 28(3), Article 1230. <https://doi.org/10.3390/molecules28031230>
 85. Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., Cifelli, C. J., Cotter, P. D., Foligné, B. et al. (2017). Health benefits of fermented foods: Microbiota and beyond. *Current Opinion in Biotechnology*, 44, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.11.010>
 86. Ahmad, R., Oli, A. N., Etando, A., Sharma, P., Sinha, S., Chowdhury, K. et al. (2023). Lactic acid bacteria fermented foods: Impact on immune system and consequences over type 2 diabetes mellitus. *Journal of Applied Pharmaceutical Sciences*, 13(6), 18–56. <https://doi.org/10.7324/JAPS.2023.142387>
 87. Zhu, H., Guo, L., Yu, D., Du, X. (2022). New insights into immunomodulatory properties of lactic acid bacteria fermented herbal medicines. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 1073922. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1073922>
 88. Anumudu, C. (2023). Role of lactic acid bacteria in the production of fermented foods. *Journal of Food Microbiology, Safety and Hygiene*, 8(12), Article 227. <https://doi.org/10.35248/2476-2059.23.8.227>
 89. Moon, A., Sun, Y., Wang, Y., Huang, J., Zafar Khan, M. U., Qiu, H. -J. (2022). Lactic acid bacteria as mucosal immunity enhancers and antivirals through Oral Delivery. *Applied Microbiology*, 2(4), 837–854. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol2040064>
 90. Forstova, V., Belkova, B., Riddellova, K., Vaclavik, L., Prihoda, J., Hajslova, J. (2014). Acrylamide formation in traditional Czech leavened wheat-rye breads and wheat rolls. *Food Control*, 38, 221–226. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.10.022>
 91. Anyogu, A., Olukorede, A., Anumudu, C., Onyeaka, H., Aredo, E., Adewale, O. et al. (2021). Microorganisms and food safety risks associated with indigenous fermented foods from Africa. *Food Control*, 129, Article 108227. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108227>
 92. Antunes, P., Novais, C., Peixe, L. (2019). Food-to-humans bacterial transmission. Chapter in a book: Microbial Transmission. John Wiley and Sons, 2019. <https://doi.org/10.1128/97811555819743.ch9>
 93. Christianah, O. I. (2024). The role of lactic acid bacteria in food processing, nutrition and human health. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 13(10), 288–296. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2024.1310.033>
 94. Aeni, N. (2023). Analisis kadar Protein pada fermentasi kembang kol (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) dengan menggunakan bakteri *Lactobacillus Plantarum*. *Cokroaminoto Journal of Chemical Science*, 5(2), 39–41. [Aeni, N. (2023). Analysis of protein content in fermented cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) using *Lactobacillus Plantarum* bacteria. *Cokroaminoto Journal of Chemical Science*, 5(2), 39–41. (In Indonesian)]
 95. Yustin, L., Wijayanti, E. (2018). Aktivitas antioksidan sari rimpang temu giring (*Curcuma heyneana*) terfermentasi *Lactobacillus bulgaricus*. *JC-T (Journal Cis-Trans): Jurnal Kimia dan Terapan*, 2(1), 1–5. [Yustin, L., Wijayanti, E. (2018). Antioxidant activity of fermented pollen of the rhizome of turmeric (*Curcuma heyneana*) *Lactobacillus bulgaricus*. *JC-T (Journal Cis-Trans): Jurnal Kimia dan Terapan*, 2(1), 1–5. (In Indonesian)] <https://doi.org/10.17977/um026v2i12018p001>
 96. Chan, S., Jantama, K., Prasitpuriprecha, C., Wansutha, S., Phosirran, C., Yuenyaow, L. et al. (2024). Harnessing fermented soymilk production by a newly isolated pediococcus acidilactici F3 to enhance antioxidant level with high antimicrobial activity against food-borne pathogens during co-culture. *Foods*, 13(13), Article 2150. <https://doi.org/10.3390/foods13132150>
 97. Fessard, A., Remize, F. (2017). Why are Weissella spp. not used as commercial starter cultures for food fermentation? *Fermentation*, 3(3), Article 38. <https://doi.org/10.3390/fermentation3030038>
 98. Sari, N., Zainal, Tahir, M. M. (25 June, 2020). *Isolation and identification lactic acid bacteria of honey-enriched functional beverage from cassava (manihot esculenta) tapai from Sinjai regency*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 575, The 2nd International Conference of Interdisciplinary Research on Green Environmental Approach for Sustainable Development Gedung Pasca Sarjana, Indonesia. IOP Publishing Ltd, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/575/1/012016>
 99. Suharto, S., Agustini, T. W., Amalia, U. (2024). Effect of Pediococcus acidilactici bioaugmentation on the quality improvement of milkfish (Chanos chanos) Bekasam. *Food Research*, 8(2), 361–370. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.8\(2\).483](https://doi.org/10.26656/fr.2017.8(2).483)
 100. Priadi, G., Setiyoningrum, F., Afiati, F., Irzaldi, R., Lisdiyanti, P. (2020). Studi in vitro bakteri asam laktat kandidat probiotik dari makanan fermentasi Indonesia. *Jurnal Teknologi Dan Industri Pangan*, 31(1), 21–28. [Priadi, G., Setiyoningrum, F., Afiati, F., Irzaldi, R., Lisdiyanti, P. (2020). In vitro evaluation of probiotic candidate bacteria from Indonesian food. *Jurnal Teknologi Dan Industri Pangan*, 31(1), 21–28. (In Indonesian)] <https://doi.org/10.6066/jtip.2020.31.1.21>
 101. Mishra, S., Mithul Aravind, S., Charpe, P., Ajlouni, S., Ranadheera, C. S., Chakkaravarthy, S. (2022). Traditional rice-based fermented products: Insight into their probiotic diversity and probable health benefits. *Food Bioscience*, 50, Article 102082. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102082>
 102. Helmi, H., Astuti, D. I., Putri, S. P., Sato, A., Lavinia, W. A., Fukusaki, E. et al. (2022). Dynamic changes in the bacterial community and metabolic profile during fermentation of low-salt shrimp paste (terasi). *Metabolites*, 12(2), Article 118. <https://doi.org/10.3390/metabo12020118>
 103. Larasati, N. (2017). Studi Aktivitas Antioksidan dan Karakteristik Fisiko Kimia Tauco yang Beredar di Kota Malang, Jawa Timur. *Jurnal Pangan Dan Agroindustri*, 5(2), 85–95. [Larasati, N. (2017). Study of antioxidant activity and physicochemical characteristics of tauco circulating in Malang City, East Java. *Jurnal Pangan Dan Agroindustri*, 5(2), 85–95. (In Indonesian)]
 104. Magdalena, S., Talia, A., Yogiara, Y. (2023). Identification of lactic acid bacteria profiles from red Oncom, an Indonesian traditional mixed fermented tofu waste and peanut press cake. *Research Journal of Biotechnology*, 18(4), 84–89. <https://doi.org/10.25303/1804rjbt084089>
 105. Setiarto, R. H. B., Anshory, L., Wardana, A. A. (May 3–5, 2023). *Nutritional and microbiological characteristics of Dadih and their application to the food industry: A review*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, International

152. Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., Perego, P. (2020). Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. *Foods*, 9(11), Article 1628. <https://doi.org/10.3390/foods9111628>

153. Bontzolis, C., Pliani, I., Dimitrellou, D., Boura, K., Kanellaki, M., Nigam, P. S. et al. (2022). Isolation of antimicrobial compounds from aniseed and techno-economic feasibility report for industrial-scale application. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(8), 5155–5163. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15824>

154. Manzoor, A., Khan, S., Dar, A. H., Pandey, V. K., Shams, R., Ahmad, S. et al. (2023). Recent insights into green antimicrobial packaging towards food safety reinforcement: A review. *Journal of Food Safety*, 43(4), Article e13046. <https://doi.org/10.1111/jfs.13046>

155. Bortolomei, B. M., Paglarini, C. S., Brod, F. C. A. (2022). Bioactive compounds in kombucha: A review of substrate effect and fermentation conditions. *Food Chemistry*, 385, Article 132719. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132719>

156. Chennupati, R. K. (2022). Novel perspectives in food fermentation. *Journal of Food & Industrial Microbiology*, 8(1), Article 236.

157. Gänzle, M. G., Monnin, L., Zheng, J., Zhang, L., Coton, M., Sicard, D. et al. (2024). Starter culture development and innovation for novel fermented foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 15(1), 211–239. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023-034207>

158. Siddiqui, S. A., Erol, Z., Rugji, J., Taşçı, F., Kahraman, H. A., Toppi, V. et al. (2023). An overview of fermentation in the food industry – looking back from a new perspective. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1), Article 85. <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00702-y>

159. Crater, J. S., Lievense, J. C. (2018). Scale-up of industrial microbial processes. *FEMS Microbiology Letters*, 365(13), Article fny138. <https://doi.org/10.1093/femsle/fny138>

160. Okeke, E. S., Ita, R. E., Egong, E. J., Udofia, L. E., Mgbachidinma, C. L., Akan, O. D. (2021). Metaproteomics insights into fermented fish and vegetable products and associated microbes. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 3, Article 100045. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2021.100045>

161. Obafemi, Y. D., Oranusi, S. U., Ajanaku, K. O., Akinduti, P. A., Leech, J., Cotter, P. D. (2022). African fermented foods: Overview, emerging benefits, and novel approaches to microbiome profiling. *Npj Science of Food*, 6(1), Article 15. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00130-w>

162. Tamang, J. P., Cotter, P. D., Endo, A., Han, N. S., Kort, R., Liu, S. Q. et al. (2020). Fermented foods in a global age: East meets west. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19, 184–217. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12520>

163. De Filippis, F., Parente, E., Ercolini, D. (2018). Recent past, present, and future of the food microbiome. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9(1), 589–608. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012312>

164. Oguntoyinbo, F. A. (2014). Safety challenges associated with traditional foods of West Africa. *Food Reviews International*, 30(4), 338–358. <https://doi.org/10.1080/87559129.2014.940086>

165. Galimberti, A., Bruno, A., Agostinetto, G., Casiraghi, M., Guzzetti, L., Labra, M. (2021). Fermented food products in the era of globalization: Tradition meets biotechnology innovations. *Current Opinion in Biotechnology*, 70, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.10.006>

166. Ramos-Lopez, O., Martinez, J. A., Milagro, F. I. (2022). Holistic integration of omics tools for precision nutrition in health and disease. *Nutrients*, 14(19), Article 4074. <https://doi.org/10.3390/nu14194074>

167. Chilton, S. N., Burton, J. P., Reid, G. (2015). Inclusion of fermented foods in food guides around the world. *Nutrients*, 7(1), 390–404. <https://doi.org/10.3390/nu7010390>

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	Принадлежность к организации
<p>Yolani Syaputri, Assistant Professor, Department of Biology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University Padjadjaran Jatinangor 45363, West Java, Indonesia E-mail: yolani.syaputri@unpad.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1593-6093 * corresponding author</p>	<p>Сьяпутри Ю. — учёный-преподаватель, кафедра биологии, факультет математики и естественных наук, Университет Паджаджаран Джатинангор, 45363, Западная Ява, Индонезия E-mail: yolani.syaputri@unpad.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1593-6093 * автор для контактов</p>
<p>Anisa M. Bariz, Student, Department of Biology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University Padjadjaran, Jatinangor 45363, West Java, Indonesia E-mail: anisa20007@mail.unpad.ac.id ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3813-3245</p>	<p>Бариз А. Н. — студент, кафедра биологии, факультет математики и естественных наук, Университет Паджаджаран Джатинангор, 45363, Западная Ява, Индонезия E-mail: anisa20007@mail.unpad.ac.id ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3813-3245</p>
<p>Rita Kusmiati, Assistant Lecturer, Department of Biology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University Padjadjaran 45363, West Java, Indonesia E-mail: rita22001@mail.unpad.ac.id ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5107-2222</p>	<p>Кусмиати Р. — ассистент преподавателя, кафедра биологии, факультет математики и естественных наук, Университет Паджаджаран Джатинангор, 45363, Западная Ява, Индонезия E-mail: rita22001@mail.unpad.ac.id ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5107-2222</p>
<p>Indri Wulandari, Assistant Professor, Department of Biology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University Padjadjaran Jatinangor 45363, West Java, Indonesia E-mail: indri.wulandari@unpad.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2486-1716</p>	<p>Вуландари И. — учёный-преподаватель, кафедра биологии, факультет математики и естественных наук, Университет Паджаджаран Джатинангор, 45363, Западная Ява, Индонезия E-mail: indri.wulandari@unpad.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2486-1716</p>
<p>Sri Rejeki Rahayu, Assistant Professor, Department of Biology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University Padjadjaran Jatinangor 45363, West Java, Indonesia E-mail: sri.rejeki@unpad.ac.id</p>	<p>Рахаю С. Р. — учёный-преподаватель, кафедра биологии, факультет математики и естественных наук, Университет Паджаджаран Джатинангор, 45363, Западная Ява, Индонезия E-mail: sri.rejeki@unpad.ac.id</p>
<p>Ratu Safitri, MS., Professor, Department of Biology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University Padjadjaran Jatinangor 45363, West Java, Indonesia E-mail: ratu.safitri@unpad.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0640-1273</p>	<p>Сафитри Р. — MS., Профессор кафедра биологии, факультет математики и естественных наук, Университет Паджаджаран Джатинангор, 45363, Западная Ява, Индонезия E-mail: ratu.safitri@unpad.ac.id ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0640-1273</p>
<p>Hitoshi Iwahashi, Professor, Laboratory of Microbiology, Faculty of Dentistry, Meikai University Chiba 279–8550, Japan E-mail: hitoshiiwahashi@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1100-5977</p>	<p>Ивахаси Х. — профессор, Лаборатория микробиологии, стоматологический факультет, Университет Мейкай Тиба 279–8550, Япония E-mail: hitoshiiwahashi@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1100-5977</p>
Contribution	Критерии авторства
<p>Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism. Yolani Syaputri — Conceptualization, Data Curation, Writing — Original Draft, Writing — Review & Editing, Visualization, Supervision, and Funding Acquisition; Anisa Mariah Bariz — Investigation, Writing — Original Draft, Writing — Review & Editing and Visualization; Rita Kusmiati — Validation, Investigation, Writing — Original Draft, Review & Editing; Indri Wulandari — Reviewed and edited the manuscript; Sri Rejeki Rahayu — Reviewed and edited the manuscript; Ratu Safitri — Reviewed and edited the manuscript; Hitoshi Iwahashi — Validation and Writing — Review and Editing.</p>	<p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат. Йолани Сьяпутри — Автор первоначального проекта, разработка концепции, авторский надзор и редактирование; Аниса Мария Бариз — Автор первоначального проекта и редактирование; Рита Кусмиати — Автор первоначального проекта, разработка концепции и редактирование; Индри Вуландари — Просмотрел и отредактировал рукопись; Шри Реджеки Рахаю — Просмотрел и отредактировал рукопись; Рату Сафитри — Просмотрел и отредактировал рукопись; Хитоши Ивахаси — Проверка и написание — Просмотр и редактирование.</p>
Conflict of interest	Конфликт интересов
<p>The authors declare no conflict of interest.</p>	<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>