

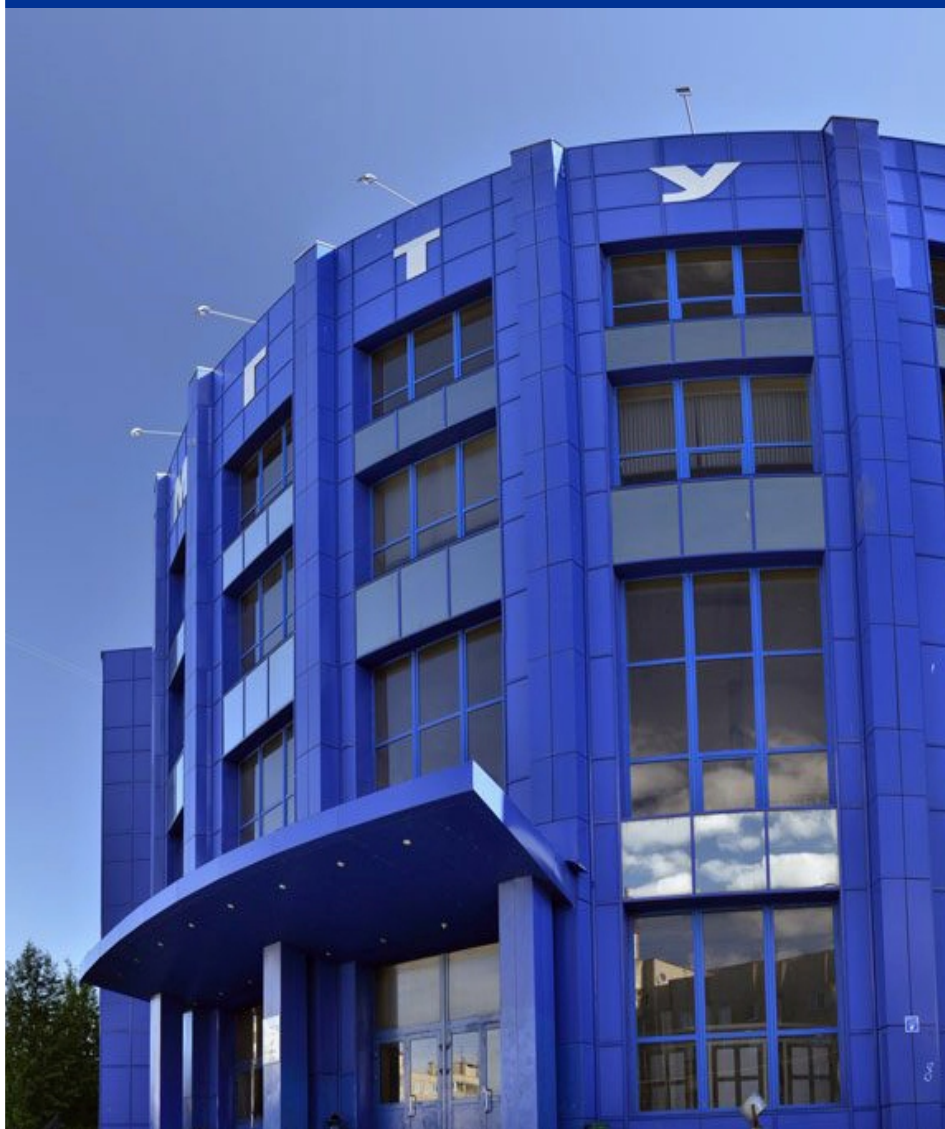
ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 29, № 3 (июль – сентябрь), 2026 г.

Вестник МГТУ

ТОМ 29, № 3, 2026



ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

БИОТЕХНОЛОГИЯ
ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ
И БИОЛОГИЧЕСКИ
АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ



FOOD SYSTEMS

BIOTECHNOLOGY
OF FOOD PRODUCTS
& BIOLOGICALLY
ACTIVE SUBSTANCES

Vestnik of MSTU

SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 29, N 3 (July – September), 2026

16+

ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

**ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 29, № 3 (июль – сентябрь), 2026 г.**



Vestnik of MSTU

**SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 29, N 3 (July – September), 2026**

**Мурманск
2026**

ВЕСТНИК МГТУ
Том 29, № 3 (июль – сентябрь), 2026 г.
Научный журнал
Издается с января 1998 г.
Выходит один раз в три месяца

Учредитель
ФГАОУ ВО «Мурманский арктический
университет»

Главный редактор
Кайченко А. В., д-р техн. наук,
доцент (Мурманск, Россия)

Редакционная коллегия по направлению
«Пищевые системы. Биотехнология продуктов
питания и биологически активных веществ»

Заместитель главного редактора
Деркач С. Р., д-р хим. наук, профессор
(Мурманск, Россия)

Члены редакционной коллегии:
Алексеев Г. В., д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербург, Россия)
Бредихин С. А., д-р техн. наук, профессор
(Москва, Россия)
Донская Г. А., д-р биол. наук, доцент
(Москва, Россия)
Красуля О. Н., д-р техн. наук, профессор
(Москва, Россия)
Литвяк В. В., д-р техн. наук, доцент
(Красково, Россия)
Мезенова О. Я., д-р техн. наук, профессор
(Калининград, Россия)
Мингалеева З. Ш., д-р техн. наук, профессор
(Казань, Россия)
Остроухова Е. В., д-р техн. наук, доцент
(Ялта, Россия)
Пеленко В. В., д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербург, Россия)
Решетник Е. И., д-р техн. наук, профессор
(Благовещенск, Россия)
Савенкова Т. В., д-р техн. наук, профессор
(Москва, Россия)
Толстобров И. Н., д-р наук
(Тронхейм, Норвегия)
Шокина Ю. В., д-р техн. наук, профессор
(Мурманск, Россия)

Адрес редакции
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13.
Тел.: (8152) 21-39-70 (доб. 35-40)
E-mail: redvst@mauniver.ru

VESTNIK OF MSTU
Volume 29, N 3 (July – September), 2026
Scientific journal
Published since January 1998
Issued quarterly

Founder
FSAEI HE «Murmansk Arctic University»

Editor-in-Chief
Kaichenov A. V., Dr Sci. (Engineering),
Ass. Professor (Murmansk, Russia)

The Editorial Board
(Food systems. Biotechnology of food products
& biologically active substances)

Deputy Editor
Derkach S. R., Dr Sci. (Chemistry),
Professor (Murmansk, Russia)

The Editorial Board Members:
Alexeev G. V., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Saint-Petersburg, Russia)
Bredikhin S. A., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Moscow, Russia)
Donskaya G. A., Dr Sci. (Biology),
Ass. Professor (Moscow, Russia)
Krasulya O. N., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Moscow, Russia)
Litvyak V. V., Dr Sci. (Engineering),
Ass. Professor (Kraskovo, Russia)
Mezenova O. Ya., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Kaliningrad, Russia)
Mingaleeva Z. Sh., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Kazan, Russia)
Ostroukhova E. V., Dr Sci. (Engineering),
Ass. Professor (Yalta, Russia)
Pelenko V. V., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Saint-Petersburg, Russia)
Reshetnik E. I., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Blagoveshchensk, Russia)
Savenkova T. V., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Moscow, Russia)
Tolstorebrov I. N., Dr Sci.
(Trondheim, Norway)
Shokina Yu. V., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Murmansk, Russia)

The Editorial Office address
Sportivnaya Str., 13,
183010, Murmansk, RUSSIA.
Phone: (8152) 21-39-70 (ext. 35-40)
E-mail: redvst@mauniver.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Биотехнология пищевых продуктов и биологически активных веществ

Колотова Д. С., Воропаева С. О., Петрова Л. А. Разработка биоразлагаемых пищевых пленок на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции из отходов трески: влияние хитозана и пластификаторов на механические и барьерные свойства.....	317
Мижева А. А., Фоменко И. А., Чернуха И. М., Подобуев Ф. В. Исследование биологически активных пептидов, полученных из гидролизатов изолята белков нута и рапса.....	335
Новиков В. Ю., Долгопятова Н. В., Коновалова И. Н., Кучина Ю. А., Глухарев А. Ю., Деркач С. Р. Синтез и характеристики карбоксиметилированных производных хитина из панцирей камчатского краба и краба-стригуна.....	347
Фоменко В. В., Большев Н. А., Машенцева Н. Г., Детинкин И. А., Алексаночкин Д. И. Исследование взаимодействия биологически активных пептидов из сои с молекулами АПФ и ДПП-4 методом молекулярного докинга.....	361
Ямашев Т. А., Хусаинов И. А., Кручина-Богданов И. В., Наумов И. А., Канарский А. В. Влияние источника углерода и условий культивирования на синтез ксантана бактериями <i>Xanthomonas campestris</i> ВКПМ В-6720 и его свойства.....	377

Технология и товароведение пищевых продуктов функционального и специализированного назначения

Величко Н. А., Рыгалова Е. А., Смольникова Я. В., Шароглазова Л. П. Комплексная переработка растительного сырья Сибири в продукты функционального назначения.....	393
Красуля О. Н., Осмоловский П. Д., Нугманов А. Х-Х., Серегин С. А., Муханбетова И. Р. Исследование сорбционных характеристик говяжьего рубца как объекта обезвоживания в технологии имитационного шпика.....	403
Поснова Г. В., Иванова Н. Г., Панчук К. А. Разработка и оценка потребительских свойств ферментированного напитка на растительной основе.....	417
Сергун В. П., Шамова М. М., Позняковский В. М., Сергеева И. Ю. Влияние географического происхождения и сезонности заготовки <i>Populus tremula</i> L. на содержание фенолов и их производных для создания функциональных пищевых систем.....	433

Промышленное рыболовство

Долотов С. И., Потуткин А. Г. Распространение половозрелых налимов (<i>Lotta lotta</i> L.) в Верхнетуломском водохранилище (Мурманская область) в посленерестовый период.....	442
--	-----

Обзорные статьи

Бурак Л. Ч. Характеристика ферментированных овощей и фруктов, их пищевая ценность и влияние на здоровье. Обзор предметного поля.....	452
Шариков А. Ю., Голубев А. А., Амелякина М. В., Иванов В. В., Абрамова И. М. Крапива двудомная <i>Urtica dioica</i> L. в пищевой промышленности: обзор предметного поля и перспективы использования.....	479

CONTENTS

Biotechnology of food products and biologically active substances

Kolotova D. S., Voropaeva S. O., Petrova L. A. Development of biodegradable food films based on collagen-containing ichthyosubstance derived from cod waste: The effect of chitosan and plasticizers on mechanical and barrier properties.....	317
Mizheva A. A., Fomenko I. A., Chernukha I. M., Podobuev F. V. Analysis of bioactive peptides derived from hydrolysates of chickpea and rapeseed protein isolates.....	335
Novikov V. Yu., Dolgopyatova N. V., Konovalova I. N., Kuchina Yu. A., Glukharev A. Yu., Derkach S. R. Synthesis and characteristics of carboxymethylated chitin derivatives from the shells of king crab and snow crab.....	347
Fomenko V. V., Bolshev N. A., Mashentseva N. G., Detinkin I. A., Aleksanochkin D. I. Study of the interaction of biologically active soy peptides with ACE and DPP-4 molecules using molecular docking.....	361
Yamashev T. A., Khusainov I. A., Kruchina-Bogdanov I. V., Naumov I. A., Kanarsky A. V. The influence of carbon source and cultivation conditions on the synthesis of xanthan gum by <i>Xanthomonas campestris</i> bacteria VKPM B-6720 and its properties.....	377

Technology and commodity science of functional and specialized food products

Velichko N. A., Rygalova E. A., Smolnikova Ya. V., Sharoglazova L. P. Integrated processing of Siberian plant raw materials into functional products.....	393
Krasulya O. N., Osmolovsky P. D., Nugmanov A. H., Seregin S. A., Mukhanbetova I. R. Investigation of sorption characteristics of beef rumen as an object of dehydration in imitation bacon technology.....	403
Posnova G. V., Ivanova N. G., Panchuk K. A. Development and evaluation of consumer properties of a fermented plant-based beverage.....	417
Sergun V. P., Shamova M. M., Poznyakovsky V. M., Sergeeva I. Yu. The effect of edaphoclimatic conditions and seasonality of <i>Populus tremula</i> L. on the content of phenols and their derivatives for creating functional food systems.....	433

Commercial fishing

Dolotov S. I., Potutkin A. G. Distribution of mature burbot (<i>Lotta lotta</i> L.) in the Verkhnetulomsky reservoir (Murmansk region) in the post-spawning period.....	442
---	-----

Review articles

Burak L. Ch. Characteristics of fermented vegetables and fruits, their nutritional value and impact on health. A review of the subject field.....	452
Sharikov A. Yu., Golubev A. A., Amelyakina M. V., Ivanov V. V., Abramova I. M. Stinging nettle <i>Urtica dioica</i> L. in the food industry: A review of the research landscape and prospects for its use.....	479

Разработка биоразлагаемых пищевых пленок на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции из отходов трески: влияние хитозана и пластификаторов на механические и барьерные свойства

Д. С. Колотова*, С. О. Воропаева, Л. А. Петрова

**Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия;*

e-mail: kolotovads@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
04.06.2026;

принята
к публикации
25.06.2026

Ключевые слова:

биоразлагаемые
пищевые пленки,
пищевая упаковка,
переработка рыбных
отходов, коллаген,
хитозан,
полиэлектролитные
комплексы,
ИК-спектроскопия,
дифференциальная
сканирующая
калориметрия

Стремительный рост объемов синтетических полимерных отходов приводит к серьезным экологическим последствиям, по этой причине все большую значимость приобретает разработка экологичных альтернатив пищевой упаковке. Использование вторичных биоресурсов, в частности отходов переработки промысловых видов рыб, позволяет одновременно решить задачи утилизации побочных продуктов рыбоперерабатывающей промышленности и создания биоразлагаемых упаковочных материалов с регулируемыми свойствами. Цель исследования – разработка биоразлагаемых пищевых пленок на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции (ИХС), выделенной из отходов трески, а также изучение влияния хитозана (ХТЗ) и пластификаторов – глицерина (Г) и сорбитола (С) – на механические и барьерные свойства пленок. Выход ихтиосубстанции из кожи и чешуи атлантической трески составил 72 %. Методом ПААГ-электрофореза определены основные молекулярные фракции ихтиосубстанции: 200, 117, 100 и 89 кДа. Получена серия образцов биоразлагаемых пленок на основе ихтиосубстанции с добавлением хитозана и различных пластификаторов – глицерина и сорбитола. Комплексный анализ микроструктуры, физико-химических, механических, барьерных и термических свойств с использованием методов оптической микроскопии, ИК-спектроскопии, гравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии, а также оценка способности к биоразложению в почве показали, что использование сорбитола в качестве пластификатора и увеличение содержания хитозана способствуют формированию более однородных, прочных и термически стойких пленок с пониженными показателями паропроницаемости и влагопоглощения. Оптимальный баланс механических и барьерных свойств наблюдается для образца состава 60 % ИХС + 37 % ХТЗ + 3 % С: прочность на разрыв – $12,1 \pm 1,1$ МПа, температура плавления – $130,4$ °С, паропроницаемость – 2819 ± 148 г/м²/сут, влагопоглощение – $49,0 \pm 6,3$ %/сут. Полученные результаты подтверждают перспективность использования коллагенсодержащей ихтиосубстанции из отходов трески для создания экологичной пищевой упаковки, поддающейся биологическому разложению.

Для цитирования

Колотова Д. С. и др. Разработка биоразлагаемых пищевых пленок на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции из отходов трески: влияние хитозана и пластификаторов на механические и барьерные свойства. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 317–334. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-317-334>.

Development of biodegradable food films based on collagen-containing ichthyosubstance derived from cod waste: The effect of chitosan and plasticizers on mechanical and barrier properties

Daria S. Kolotova*, Svetlana O. Voropaeva, Ludmila A. Petrova

*Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia;

e-mail: kolotovads@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>

Article info

Received
04.06.2026;

accepted
25.06.2026

Key words:

biodegradable
food films,
food packaging,
processing
of fish waste,
collage, chitosan,
polyelectrolyte
complexes,
IR spectroscopy,
differential scanning
calorimetry

Abstract

The rapid growth in the volume of synthetic polymer waste leads to serious environmental consequences, which is why the development of eco-friendly alternatives to food packaging is becoming increasingly important. The use of secondary bioresources, particularly processing waste from commercial fish species, allows simultaneously addressing the challenges of utilising by-products from the fish-processing industry and creating biodegradable packaging materials with tunable properties. The aim of this work is to develop biodegradable food films based on collagen-containing ichthyosubstance (ICS) extracted from cod waste, as well as to study the influence of chitosan (CS) and plasticisers, such as glycerol (G) and sorbitol (S), on the mechanical and barrier properties of the films. The yield of ichthyosubstance from the skin and scales of Atlantic cod was 72 %. Polyacrylamide gel electrophoresis (PAGE) was used to determine the main molecular fractions of the ichthyosubstance, which were found to be 200, 117, 100 and 89 kDa. A series of biodegradable film samples was produced based on the obtained ichthyosubstance, with the addition of chitosan and various plasticisers (glycerol and sorbitol). Comprehensive characterisation of the microstructure, physicochemical, mechanical, barrier and thermal properties (via optical microscopy, IR spectroscopy, gravimetry and differential scanning calorimetry), together with an evaluation of soil biodegradability, demonstrated that incorporating sorbitol as a plasticiser and increasing the chitosan content leads to the formation of films exhibiting enhanced uniformity, durability and thermal stability, along with lower water vapour permeability and moisture absorption. An optimal balance of mechanical and barrier properties was observed for the sample with the following composition: 60 % ICS + 37 % CS + 3 % S. The sample exhibited the following properties: tensile strength – 12.1 ± 1.1 MPa; melting point – 130.4 °C; water vapour permeability – 2819 ± 148 g/m²/day; moisture absorption – 49.0 ± 6.3 %/day. The obtained results confirm the potential of using collagen-containing ichthyosubstance from cod waste for developing eco-friendly food packaging with controlled biodegradability.

For citation

Kolotova, D. S. et al. 2026. Development of biodegradable food films based on collagen-containing ichthyosubstance derived from cod waste: The effect of chitosan and plasticizers on mechanical and barrier properties. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 317–334. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-317-334>.

Введение

Производство и широкое применение синтетической пластиковой упаковки для хранения пищевой продукции, несмотря на ее низкую стоимость, высокую прочность и отличные барьерные характеристики, связаны со значительными экологическими рисками. На долю упаковки из пластика сегодня приходится около 40 % всех пластиковых отходов в мире (Kumar et al., 2025). При этом уровень переработки пластиковых отходов остается низким: по разным оценкам лишь 6–26 % пластиковых отходов перерабатываются для повторного использования, в то время как большая их часть накапливается на свалках или в естественной среде. При этом более 70 % этого объема приходится на одноразовый пластик, который в основном используется для упаковки пищи (Ncube et al., 2021). Наиболее серьезные опасения вызывает накопление значительных объемов неразлагаемых пластиковых отходов в окружающей среде, которые наносят непоправимый вред природе и животному миру (Robles-Vargas et al., 2025; Sheriff et al., 2025). Все это способствует стремительному развитию рынка биополимерных упаковочных материалов (Kumar et al., 2025).

Биоразлагаемые упаковочные материалы, получаемые из возобновляемых источников, могут стать перспективным решением проблемы загрязнения окружающей среды, благодаря чему они активно изучаются в течение последних десятилетий (He et al., 2025; Kumar et al., 2025). Биополимеры, такие как крахмал (Onyeaka et al., 2022), целлюлоза (Liu et al., 2023), животные и растительные белки (Zubair et al., 2020), а также полимолочная кислота (Rajendran et al., 2024), являются биоразлагаемыми, что делает их перспективными материалами для разработки безопасной альтернативы синтетическим полимерам. Многие из этих биополимеров получают из агропромышленных отходов, что повышает экологичность и экономическую целесообразность использования биоупаковки (Kumar et al., 2025). Эти биополимеры особенно востребованы в пищевой промышленности благодаря тому, что могут содержать биологически активные вещества, такие как натуральные противомикробные средства или антиоксиданты, которые помогают продлить срок хранения продуктов и предотвратить их порчу (Shaikh et al., 2021). Некоторые натуральные биополимеры обладают отличными пленкообразующими свойствами. Полисахариды, такие как целлюлоза, пектин, крахмал и альгинат натрия, обладают достаточными барьерными свойствами, а белки (например, казеин, желатин, проламины) способствуют повышению механической прочности, прозрачности и эластичности пленок (Kumar et al., 2025). Дополнительные добавки, такие как каррагинан, пуллулан, кефирин и хитозан, обладают функциональными преимуществами, в том числе антимикробной активностью и сниженной паропроницаемостью (Liyanapathirana et al., 2023; Rostamabadi et al., 2024).

Пленки на основе желатина – продукта гидролиза коллагена, обладают высокой растяжимостью и высокой прозрачностью, но меньшей прочностью на разрыв и большей растворимостью в воде (Ramos et al., 2016). В сочетании с полисахаридами или биоактивными веществами, такими как хитозан, желатиновые покрытия эффективно подавляют развитие патогенных микроорганизмов, продлевая тем самым сроки хранения продукции, и демонстрируют увеличение барьерных свойств (Сергазиева и др., 2025; Li et al., 2025). В целом пленки на основе животных белков превосходят полисахаридные матрицы по механическим свойствам и паропроницаемости, но более чувствительны к влаге. Благодаря съедобности, прозрачности и совместимости с функциональными добавками они идеально подходят для нанесения покрытий и создания активной упаковки, представляя собой биоразлагаемую и безопасную альтернативу синтетическим полимерам.

В контексте поиска решений для повышения ресурсоэффективности важное значение приобретает разработка упаковочных материалов с применением биополимеров, полученных из биологических отходов. Особый интерес представляет рыбный желатин, выделяемый из рыбных отходов промысловых рыб (Еремеева и др., 2023). При разделке рыб образуется значительное количество побочных продуктов, в том числе кожа и чешуя, представляющих собой ценный источник желатина. При этом доля кожи и чешуи достигает 10 % от массы рыбы (Олдырев и др., 2023; Казакова и др., 2024). Кроме того, рыбный желатин более безопасен по сравнению с желатином из крупного рогатого скота, использование которого несет потенциальные риски возникновения аллергических реакций и передачи патогенов, вызывающих прионные заболевания, такие как губчатая энцефалопатия крупного рогатого скота (Gómez-Guillén et al., 2009).

Таким образом, внедрение технологии биоразлагаемых пищевых покрытий на основе желатина, выделенного из кожи и чешуи рыб, в сочетании с полисахаридами природного происхождения обеспечивает одновременное решение двух приоритетных задач: разработку экологически чистых защитных покрытий для применения в пищевой промышленности и рациональное использование продуктов переработки отходов рыбного производства в качестве основного сырья для данных покрытий. Комплексный подход способствует снижению антропогенной нагрузки и рациональному использованию биоресурсов.

Целью работы является разработка биоразлагаемых пищевых пленок на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции, выделенной из отходов трески (кожи и чешуи), а также изучение влияния хитозана и пластификаторов (глицерина и сорбитола) на механические и барьерные свойства пленок.

Материалы и методы

В качестве сырья для получения коллагенсодержащей ихтиосубстанции использовали кожу и чешую трески атлантической. Свежее сырье промывали в проточной воде, замораживали и хранили в морозильной

камере при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Жидкую ихтиосубстанцию получали по методике, описанной в работе (Олдырев и др., 2023), с незначительными модификациями. Замороженное сырье измельчали в мясорубке, после чего смешивали измельченную кожу и чешую с 3%-м раствором уксусной кислоты в соотношении 1 : 1,15. pH полученной смеси составил 4,15. Проводили кислотный гидролиз в течение 40 мин при температуре $60,0 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и постоянном перемешивании со скоростью 400 об/мин. Нерастворившуюся часть отделяли путем фильтрации через капроновую ткань, после чего полученный фильтрат дважды центрифугировали со скоростью 5000 об/мин в течение 15 мин с использованием лабораторной центрифуги UC-1536E (ULAB, Китай). После получения жидкую ихтиосубстанцию направляли на анализ и использовали для приготовления пленок.

Содержание белка в жидкой ихтиосубстанции определяли спектрофотометрическим методом Варбурга – Кристиана (Layne, 1957), основанном на поглощении ультрафиолетового света белками при значениях длины волны 260 и 280 нм, с использованием ультрафиолетового спектрометра UNICO-2800 (UNICO, США) при толщине слоя 10 мм и температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Содержание золы в ихтиосубстанции устанавливали путем сжигания образцов в муфельной печи при температуре $550 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Содержание влаги определяли путем высушивания образцов пленок в сушильном шкафу при $105 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы.

Молекулярно-массовый состав ихтиосубстанции определяли методом вертикального электрофореза в полиакриламидном геле в присутствии додецилсульфата натрия (ПААГ-электрофорез) с использованием установки Mini-PROTEAN Tetra (BIO-RAD, США), оснащенной источником питания Эльф-8 (ООО "ДНК-Технология", Россия). Для разделения белков использовали градиентные полиакриламидные пластины и протеиновые гели TGX с концентрацией геля 8–16 % (BIO-RAD, США). Разделение белковых фракций проводили при силе тока 20 мА и напряжении 100 В. Для определения молекулярных масс белковых фракций использовали электрофоретический анализ подвижности стандартных маркеров (Servicebio Technology, Китай) – белков с известной молекулярной массой от 200 кДа до 10 кДа.

Готовили раствор хитозана из панциря креветки (Sigma, США) с концентрацией 4 мас.% в растворе уксусной кислоты с концентрацией 3 %. Степень деацетилирования хитозана составляет 76,2 %, среднемассовая молекулярная масса – 250 кДа (Derkach et al., 2025).

В качестве пластификаторов использовали глицерин дистиллированный пищевой ПК-94 (E422, Glycerine.ru LTD, Россия) с содержанием основного вещества не менее 99 % и сорбитол пищевой (E420, Shandong Lujian Biological Technology Co. Ltd., Китай) с содержанием основного вещества не менее 96 %.

Готовили смеси ихтиосубстанции, хитозана и пластификатора в соотношениях, указанных в табл. 1. После гомогенизации смесей проводили дегазацию под вакуумом при комнатной температуре в течение 30 мин для удаления растворенного воздуха. Готовые смеси массой $60,0 \pm 0,2\text{ г}$ заливали в силиконовые формы размером $13,5 \times 13,5\text{ см}$ и равномерно распределяли по дну формы. Силиконовые формы помещали в сушильный шкаф с принудительной конвекцией и высушивали при температуре $45 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 16 ч. После сушки готовые пленки аккуратно извлекали из форм и хранили в герметично закрывающихся zip-пакетах во избежание поглощения влаги и загрязнения пленок. В качестве образца сравнения использовали стандартную пищевую пленку из полиэтилена.

Таблица 1. Состав смесей, используемых для изготовления пленок

Table 1. Composition of mixtures used for film fabrication

Образец	Пластификатор	Содержание ихтиосубстанции, мас. %	Содержание 4%-го р-ра хитозана, мас. %	Содержание пластификатора, мас. %
1	Глицерин	70	26	4
2		60	37	3
3	Сорбитол	70	26	4
4		60	37	3

Изменение цвета пленок исследовали с использованием спектроцетопредельителя ColorReader CR9 (3nh, Китай). Полученные образцы анализировали с использованием модели CIE Lab. Общее цветовое отличие ΔE , выражающее отклонение воспроизводимого цвета от эталонного белого образца, определяли по формуле

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{0.5}, \quad (1)$$

где L – яркость (от 0 до 100, где 0 – черный, 100 – белый); a – параметр, выражающий изменение оттенка от зеленого до красного; b – параметр, выражающий изменение оттенка от синего до желтого.

Толщину готовых пленок измеряли в 10 различных точках при помощи цифрового микрометра REXBETI (Китай) с погрешностью измерений 0,001 мм.

Растворимость пленок в воде определяли гравиметрическим методом. Пленки предварительно высушивали в сушильном шкафу при 105 ± 2 °С, охлаждали до комнатной температуры, после чего добавляли 10 мл дистиллированной воды и выдерживали в закрытых емкостях в течение суток при комнатной температуре, осуществляя периодическое перемешивание. Нерастворившуюся часть пленки отделяли от растворителя декантацией, после чего пленки высушивали до постоянной массы при 105 °С. Растворимость пленок определяли по формуле

$$R = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100, \quad (2)$$

где m_0 – масса пленки до растворения, г; m_1 – масса пленки после выдерживания в воде и сушки, г.

Значение коэффициента пропускания пленок (T_{600}) определяли с использованием ультрафиолетового спектрометра UNICO-2800 (UNICO, США) при длине волны 600 нм относительно воздуха.

Исследование механических свойств пленок проводили с использованием разрывной машины ZP-500 (Китай), оснащенной динамометром с предельной нагрузкой 500 Н и электронным датчиком хода. Для испытаний вырезали образцы пленок размером 7×1 см. Исследование механических свойств пленок проводили в соответствии с ГОСТ Р 35226-2008¹.

Влагопоглощение пленок измеряли путем выдерживания высушенных образцов в эксикаторе с влажностью ≥ 98 % в течение 24 ч при температуре 25 ± 2 °С с последующим взвешиванием. Влагопоглощение (X , %) рассчитывали по формуле

$$X = \frac{m_w}{m_0} \times 100, \quad (3)$$

где m_w – масса влаги, поглощенной образцом через время t , г; m_0 – масса высушенной пленки, г.

Проницаемость пленок выявляли гравиметрическим методом, основанном на определении количества водяного пара, проходящего через материал, в соответствии с ГОСТ 21472-81² с модификациями. Для этого образцы пленок закрепляли на горлышках пробирок объемом 4 мл и диаметром 1,5 см, в которые предварительно помещали по 1 мл дистиллированной воды. Взвешивали пробирки с водой и пленками, после чего помещали в эксикатор и выдерживали при температуре 25 ± 2 °С в течение суток. Взвешивание пробирок проводили через 24 ч. Проницаемость пленок по отношению к водяному пару (WVP , г/м²) рассчитывали по формуле

$$WVP = \frac{10 \times \Delta m}{S}, \quad (4)$$

где Δm – изменение массы пробирки за время t , г; S – испытываемая площадь образца, м².

Поверхность пленок исследовали методом оптической микроскопии с использованием стереомикроскопа MC-1 var. 2C Digital (Микромед, Россия) при 4-кратном увеличении.

Инфракрасные спектры пропускания пленок регистрировали с использованием инфракрасного спектрометра с Фурье-преобразованием ФСМ 2202 (Инфраспек, Россия), оснащенного приставкой НПВО-Алмаз (Инфраспек, Россия) в диапазоне частот 4000–600 см⁻¹ (количество сканирований – 50) с разрешением 4 см⁻¹. В качестве спектра сравнения использовали спектр чистой алмазной призмы. Проводили сравнение полученных спектров пленок со спектрами, полученными для образцов индивидуальных веществ, входящих в состав пленок.

Термические свойства пленок исследовали с использованием дифференциального сканирующего калориметра DZ-DSC300C (NanJing Testing Instruments, Китай). Регистрировали зависимость теплового потока (dQ/dT) от температуры. Перед измерениями прибор калибровали по стандартным материалам (In, Sn). Образцы пленок массой 10–12 мг вырезали по форме тигля, плотно укладывали в алюминиевый тигель с проколотой крышкой. В качестве образца сравнения использовали аналогичный пустой тигель с проколотой крышкой. Образцы исследовали в токе азота (скорость подачи – 25 мл/мин) в режиме нагрева со скоростью 10 °С/мин в диапазоне температур от 0 до 200 °С. Перед каждым измерением исследуемый образец выдерживали при температуре начала эксперимента (0 °С) в течение 5 мин.

Биоразлагаемость пленок исследовали путем экспозиции на поверхности и в толще увлажненного универсального питательного грунта. Биоразлагаемость пленок в почве определяли визуально, а также

¹ ГОСТ Р 35226-2008. Полотна нетканые. Методы определения прочности. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/48200/?ysclid=mqukh04jd9536318007>.

² ГОСТ 21472-81. Материалы листовые. Гравиметрический метод анализа. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/13585/?ysclid=mqukh1mk8859998065>.

с использованием оптического микроскопа CX43 (Olympus, Япония). Эксперимент проводили в условиях естественного освещения в течение 20 суток при температуре 25 ± 2 °C и относительной влажности воздуха не более 65 %.

Статистическую обработку данных проводили в программной среде Microsoft Office с использованием *t*-критерия Стьюдента при доверительной вероятности $P = 95$ %. Полученные значения выражали как среднее значение трех измерений со стандартным отклонением.

Результаты и обсуждение

Получена коллагенсодержащая ихтиосубстанция из отходов переработки атлантической трески – кожи и чешуи, выход жидкой ихтиосубстанции составил $72 \pm 1,0$ %. Ихтиосубстанция представляет собой полупрозрачную жидкость светло-желтого цвета с характерным слабым укусным запахом. Содержание влаги в образце составляет $91,2 \pm 0,2$ %, белка – $7,0 \pm 1,0$ %, золы – $0,65 \pm 0,01$ %. Полученная коллагенсодержащая ихтиосубстанция характеризуется значением $pH = 3,98$ (табл. 2). Использование ихтиосубстанции в составе биоразлагаемых пленок способно оказывать ингибирующее действие на рост микроорганизмов за счет кислой среды, что потенциально повышает защитные свойства конечных материалов.

Таблица 2. Выход и характеристики ихтиосубстанции, выделенной из кожи и чешуи атлантической трески

Table 2. Yield and characteristics of ichthyosubstance extracted from the skin and scales of Atlantic cod

Выход, %	Содержание влаги, %	Содержание белка, %	Содержание золы, %	pH
$72,0 \pm 1,0$	$91,2 \pm 0,2$	$7,0 \pm 1,0$	$0,65 \pm 0,01$	$3,98 \pm 0,02$

Определены молекулярно-массовые характеристики ихтиосубстанции методом ПААГ-электрофореза (рис. 1).

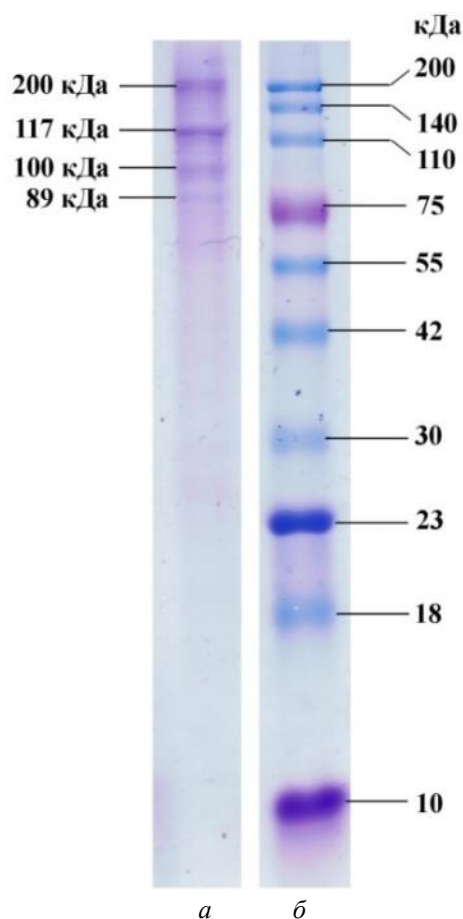


Рис. 1. Электрофореграммы ихтиосубстанции (а) и стандарта белков с молекулярными массами 10–200 кДа (б)

Fig. 1. Electropherograms of ichthyosubstance (a) and a protein standard with molecular weights of 10–200 kDa (b)

Анализ электрофореграмм демонстрирует наличие четырех основных белковых фракций в исследуемом образце. Наличие широких интенсивных полос, отвечающих фракциям с молекулярными массами 200 кДа и 117 кДа, указывает на высокое содержание частично гидролизированных β -цепей в ихтиосубстанции. Также на электрофореграмме присутствуют полосы белковых фракций с молекулярными массами порядка 100 кДа и 89 кДа, наличие которых свидетельствует о присутствии α -цепей и частично гидролизированных α -цепей соответственно. Низкая интенсивность полос на уровнях 100 и 89 кДа указывает на невысокое содержание данных компонентов в ихтиосубстанции. Наличие α - и β -фракций является характерным для желатина, выделенного из кожи трески (*Derkach et al.*, 2019). Таким образом, основным компонентом полученной ихтиосубстанции является желатин.

Коллагенсодержащая ихтиосубстанция была использована в качестве основы для получения биоразлагаемых пищевых пленок. В качестве структурообразователя использовали хитозан, в качестве пластификатора – глицерин и сорбитол. Различия в молекулярном строении и молекулярной массе глицерина и сорбитола определяют их различное действие на механические и барьерные свойства формируемых биополимерных пленок. Глицерин, представляющий собой трехатомный спирт с низкой молекулярной массой ($M = 92,09$ г/моль), легче проникает между полимерными цепями из-за малого размера, ослабляя межмолекулярные связи и повышая гибкость. Сорбитол, благодаря большему размеру молекулы ($M = 182,17$ г/моль) и сходству с глюкозными единицами, активнее взаимодействует с полимерными цепями, создавая прочные межмолекулярные связи и обеспечивая более высокую прочность материала (*Cao et al.*, 2018).

Внешний вид готовых пленок представлен на рис. 2. Пленки представляют собой однородные прозрачные глянцевые покрытия с желтоватым оттенком и характерным слабым укусным запахом.

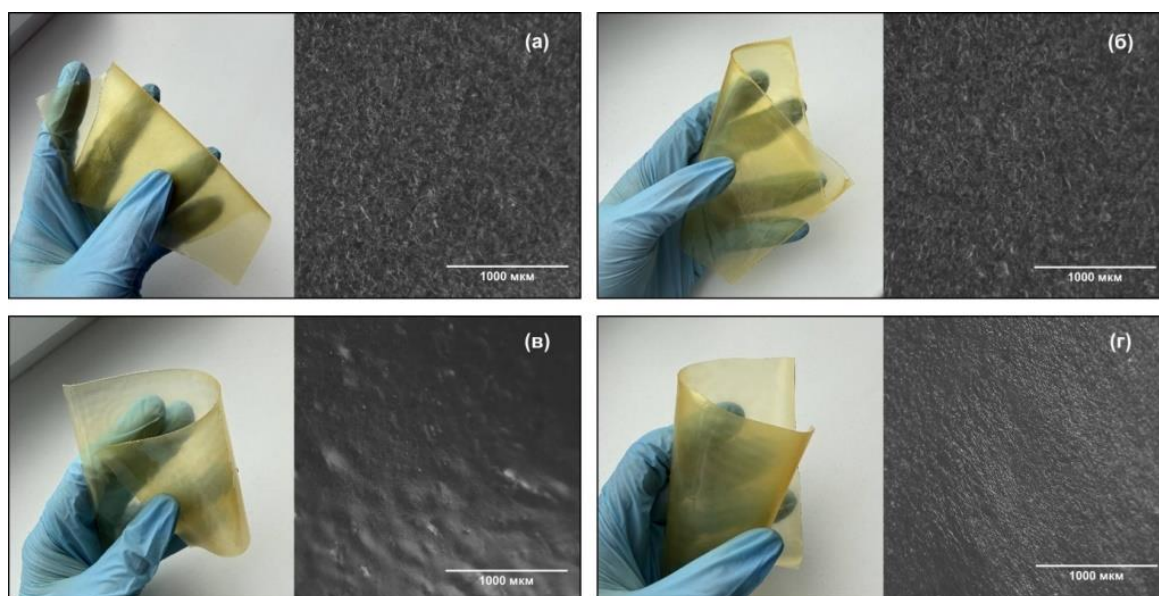


Рис. 2. Внешний вид и микрофотографии полученных пленок, где *a* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3; *г* – образец 4. Увеличение – 4X

Fig. 2. Appearance and microphotographs of the obtained films where *a* – sample 1; *б* – sample 2; *в* – sample 3; *г* – sample 4. Magnification – 4X

Цветовые характеристики пленок приведены в табл. 3. При увеличении содержания хитозана в системе смещение оттенка образцов в желтую область увеличивается, о чем свидетельствует рост значений b^* , при этом тип пластификатора на желтизну образцов практически не влияет. Значения параметра a^* для всех образцов имеет отрицательное значение, что свидетельствует о смещении оттенка в зеленую область. Значения параметра L^* , отражающего изменение яркости цвета, лежат в диапазоне от 86 до 87 и близки к 100. Наибольшими значениями общего цветового отличия от эталона ΔE^* характеризуются образцы 2 и 4.

Таблица 3. Цветовые характеристики пленок
Table 3. Color characteristics of films

Образец	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
1	87,28	–2,42	25,86	27,48
2	87,05	–2,33	31,97	33,18
3	87,42	–1,28	24,47	26,09
4	85,99	–1,20	30,11	31,81

Анализ микроструктуры пленок демонстрирует значительные отличия при использовании различных пластификаторов. Поверхность образцов 1 и 2, пластифицированных глицерином (рис. 2, а, б), характеризуется аморфно-волокнистой структурой, также на поверхности визуализируются хаотично расположенные микропоры и углубления, что может приводить к более высокой проницаемости для газов и влаги. Поверхность пленок, пластифицированных сорбитолом, имеет более однородную структуру, представленную волокнами и фибриллами (рис. 2, в, г). На поверхности образца 3 (рис. 2, в) наблюдаются локальные уплотнения и/или скопления частиц (более светлые области), что может свидетельствовать о неравномерном распределении компонентов или кристаллизации сорбитола при сушке. Подобная морфология типична для белковых композитов, в которых макромолекулы коллагена и хитозана склонны к самосборке в надмолекулярные структуры (*Jridi et al., 2014*). Поверхность образца 4 имеет умеренную шероховатость с выраженной фибриллярной морфологией: прослеживается сеть переплетающихся тонких волокон (рис. 2, г). Это свидетельствует о формировании надмолекулярной структуры, характерной для белковых и полисахаридных компонентов. Между волокнами визуализируются равномерно распределенные мелкие углубления и поры. Также на поверхности образца 4 отсутствуют выраженные кристаллические включения, что может свидетельствовать о равномерном распределении компонентов в матрице и отсутствии локальной кристаллизации сорбитола на поверхности. В отличие от идеально гладких синтетических пленок, на поверхности пленки наблюдается развитый микрорельеф, но при этом структура является более упорядоченной и однородной по сравнению с образцами 1–3.

Исследованы физико-химические свойства пленок, результаты приведены в табл. 4. Установлено, что полученные пленки характеризуются толщиной порядка 0,3 мм, что в 10 раз превышает толщину пищевой пленки из полиэтилена. Содержание влаги в пленках, пластифицированных глицерином, варьируется от 32 до 35 %, в то время как содержание влаги в пленках, пластифицированных сорбитолом, значительно ниже и составляет порядка 10 %. Глицерин обладает более высокой гидрофильностью по сравнению с сорбитолом, вследствие чего сильнее удерживает влагу в полимерной матрице пленки (*Al-Hassan et al., 2012*).

Таблица 4. Физико-химические свойства пленок
Table 4. Physicochemical properties of films

Образец	Состав образца	Содержание влаги, %	Толщина пленки, мм	Растворимость, %	Пропускание T_{600} , %
1	70 % ИХС ^а + 26 % ХТЗ ^б + 4 % Г ^в	35,6 ± 2,3	0,30 ± 0,10	30,7 ± 6,1	48,5 ± 4,5
2	60 % ИХС ^а + 37 % ХТЗ ^б + 3 % Г ^в	32,0 ± 4,4	0,32 ± 0,13	29,2 ± 5,2	63,2 ± 4,2
3	70 % ИХС ^а + 26 % ХТЗ ^б + 4 % С ^г	10,2 ± 0,5	0,27 ± 0,13	23,5 ± 5,4	49,0 ± 4,8
4	60 % ИХС ^а + 37 % ХТЗ ^б + 3 % С ^г	10,7 ± 3,3	0,28 ± 0,12	24,6 ± 5,5	64,5 ± 4,0
5	Полиэтилен	–	0,03 ± 0,01	–	90,6 ± 0,2

Примечание. а – ихтиосустанция, б – хитозан, в – глицерин, г – сорбитол.

Установлено, что введение сорбитола в качестве пластификатора приводит к незначительному уменьшению растворимости пленок на 5–7 % по сравнению с аналогичными образцами, пластифицированными глицерином (табл. 4). Такое поведение может быть обусловлено различиями во взаимодействии пластификаторов с полимерной матрицей, а также гидрофильной природой глицерина, которая увеличивает сродство пленок к воде и ухудшает их гигроскопические характеристики (*Al-Hassan et al., 2012; Cao et al., 2018*).

Коэффициент пропускания пленок варьируется в диапазоне от 48 до 64 % (табл. 4), т. е. материалы являются полупрозрачными, что может свидетельствовать о высоком поглощении пленками проходящего света либо его частичном отражении от поверхности пленок. Материалы со средними значениями коэффициента светопропускания, т. е. частично блокирующие ультрафиолетовое излучение, способны обеспечить достаточную защиту продукта от фотохимического разрушения в процессе хранения, при этом уровень пропускания видимого света остается достаточным для визуального контроля содержимого без вскрытия упаковки (*Cao et al., 2018*).

Получены ИК-спектры образцов пленок, а также индивидуальных веществ, входящих в их состав (рис. 3). Спектр коллагенсодержащей ихтиосустанции содержит характерные для желатина полосы поглощения: 3 338 (Амид А, растяжение связи N–H), 1 638 (Амид I, растяжение связи C=O), 1 591–1 460 (Амид II, деформационные колебания NH-групп и колебания растяжения CN-групп), 1 266 (Амид III, растяжение связей C–N и N–H) (*Pranoto et al., 2007; Staroszczyk et al., 2012*). На спектре хитозана наблюдается широкая полоса поглощения в области 3 418, соответствующая валентными колебаниями O–H и N–H связей, а также полосы 1 648, 1 560 и 1 407 см⁻¹, соответствующие связям Амид I, Амид II и деформационным

колебаниям О–Н групп. Наличие перечисленных полос поглощения согласуется с данными, приведенными для хитозана (Abugoch *et al.*, 2011).

При введении хитозана в состав пленок (образцы 1–4, рис. 3) на основе коллагенсодержащей ихтиосустанции наблюдается сдвиг полосы поглощения Амид А в сторону более низких волновых чисел: с 3338 до 3284–3281 см^{-1} , что указывает на образование межмолекулярных водородных связей между желатином и хитозаном (Staroszczyk *et al.*, 2014; Voron'ko *et al.*, 2016). Сдвиг полосы Амид II хитозана с 1560 до 1533–1541 см^{-1} подтверждает наличие электростатических взаимодействий между карбоксильными группами белка и аминогруппами хитозана и образование полиэлектролитных комплексов (Staroszczyk *et al.*, 2014). Формирование полиэлектролитных комплексов на основе желатина и хитозана ранее подтверждалось в работах (Pereda *et al.*, 2011; Rivero *et al.*, 2009; Sionkowska *et al.*, 2004). Кроме того, на спектрах наблюдается смещение полосы Амид II ихтиосустанции с 1591 в область 1533–1541 см^{-1} , что может также указывать на образование водородных связей, в которых участвуют группы –NH ихтиосустанции (Staroszczyk *et al.*, 2014). Изменения интенсивности полосы Амид III и сдвиг с 1266 см^{-1} в область 1242–1246 см^{-1} при различных соотношениях ихтиосустанции и хитозана указывают на то, что аминогруппы хитозана взаимодействуют преимущественно с карбоксильными группами желатина посредством электростатических взаимодействий (Jridi *et al.*, 2014; Pereda *et al.*, 2011; Rivero *et al.*, 2009).

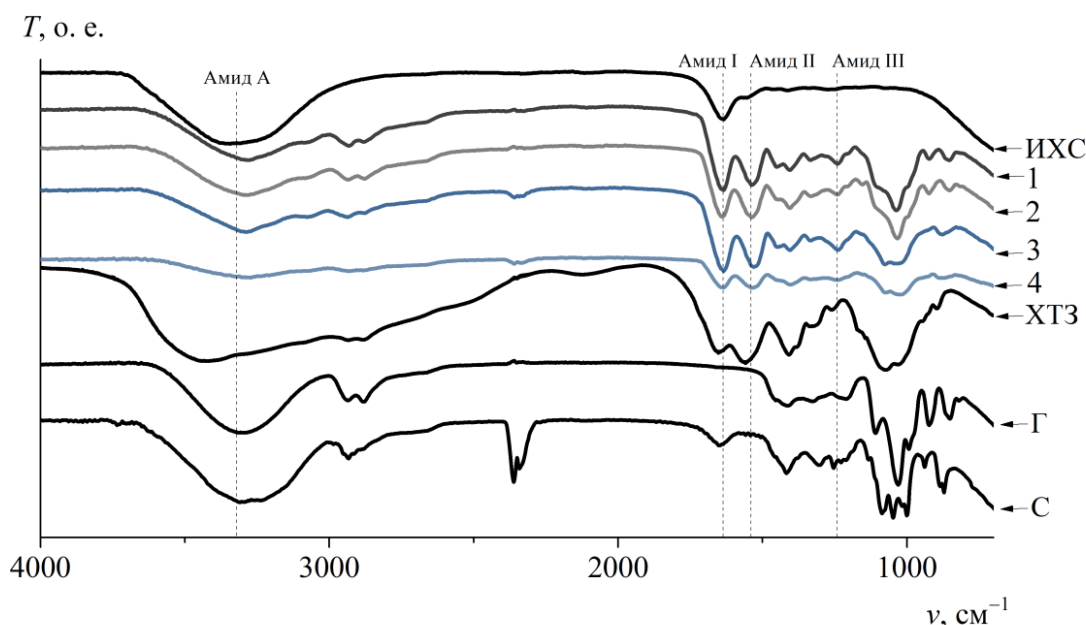


Рис. 3. Инфракрасные спектры образцов пленок (1–4), ихтиосустанции (ИХС), хитозана (ХТЗ), глицерина (Г) и сорбитола (С)

Fig. 3. Infrared spectra of film samples (1–4), ichthyosubstance (ИХС), chitosan (ХТЗ), glycerol (Г) and sorbitol (С)

Необходимо отметить, что спектральные изменения в области валентных колебаний О–Н и N–H групп (3500–3000 см^{-1}) биополимеров могут быть также связаны с различным пластифицирующим действием сорбитола и глицерина, содержащих гидроксильные группы, которые способны образовывать водородные связи с гидроксильными и аминогруппами хитозана и желатина. На спектрах наблюдается сдвиг полос, отвечающих деформационным колебаниям гидроксильных групп глицерина и сорбитола, из области 1416–1417 см^{-1} в область 1404–1406 см^{-1} для пленок, что может указывать на образование дополнительных водородных связей между гидроксильными группами пластификаторов и функциональными группами хитозана и желатина. Кроме того, полоса Амид А на спектрах пленок 3–4, пластифицированных сорбитолом, оказывается более узкой по сравнению со спектрами пленок, пластифицированных глицерином (образцы 1–2). Сорбитол имеет склонность к формированию кристаллических областей при высыхании пленки, эти области создают локальные жесткие участки, где водородные связи упорядочены. Это приводит к меньшей пластификации пленок и повышению жесткости материала (Ma *et al.*, 2018). Глицерин образует множественные водородные связи с ОН– и NH–группами биополимеров. Это нарушает упорядоченность водородных связей внутри матрицы, заставляя молекулы колебаться в более широком диапазоне частот

(Rosmawati et al., 2025; Al-Hassan et al., 2012). Таким образом, глицерин увеличивает подвижность молекул, что приводит к повышению эластичности пленок.

Для оценки влияния структурных изменений пленок, происходящих при варьировании типа пластификатора и содержания хитозана, на механические свойства пленок определены показатели прочности на разрыв и относительного удлинения при разрыве, являющиеся фундаментальными характеристиками упаковочных материалов пищевого назначения. Данные показатели оказывают влияние на способность материалов сопротивляться внешнему воздействию и сохранять их целостность (Jridi et al., 2014).

С использованием разрывной машины исследованы механические свойства пленок. Полученные результаты для разработанных пленок (образцы 1–4) сравнивали с результатами механических испытаний пищевой пленки из полиэтилена (образец 5). Установлено, что полученные образцы характеризуются более высокой прочностью на разрыв по сравнению с полиэтиленовой пленкой, для которой $\sigma = 3,3$ МПа (рис. 4, а). При этом наиболее высокие показатели прочности на разрыв продемонстрировали образцы 3 и 4, пластифицированные сорбитолом: 6,5 и 12,1 МПа соответственно.

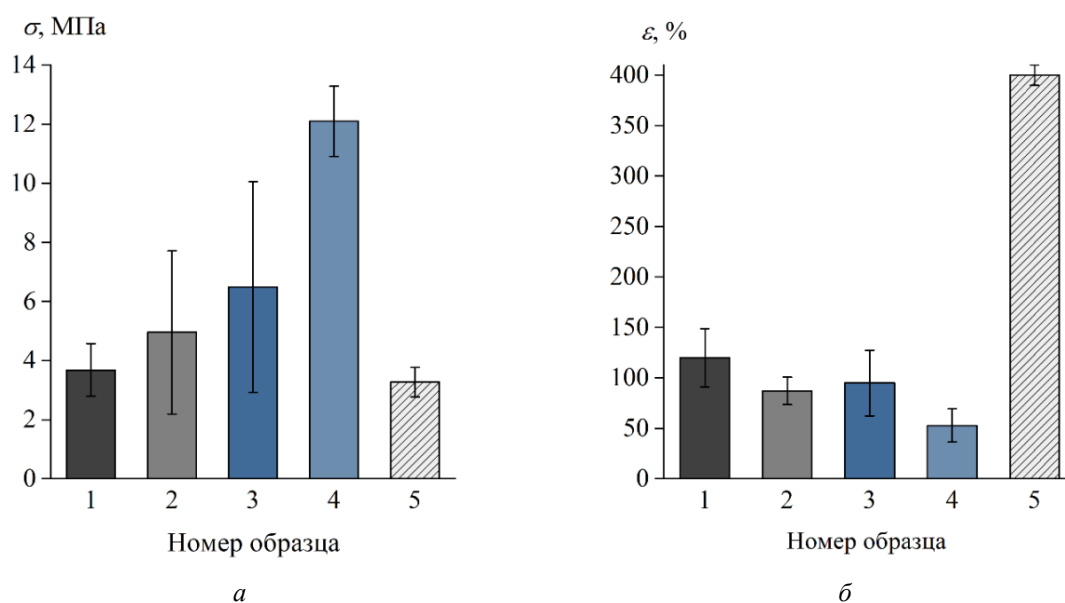


Рис. 4. Прочность на разрыв (а) и относительное удлинение при разрыве (б) образцов пленок (1–4) и пленки из полиэтилена (5)

Fig. 4. Tensile strength (a) and elongation at break (b) of film samples (1–4) and a polyethylene film (5)

Для всех образцов наблюдается увеличение прочности на разрыв при повышении доли хитозана в полимерной матрице (рис. 4, а): с 3,7 до 4,9 МПа для пленок, пластифицированных глицерином, и с 6,5 до 12,1 МПа для пленок с сорбитолом. Эти изменения связаны с особенностями взаимодействия компонентов и их влиянием на механические свойства материала. Полимерная цепь хитозана обладает более высокой жесткостью по сравнению с желатином, составляющим основу ихтиосубстанции (Hosseini et al., 2013). При увеличении его доли в составе пленки общая жесткость материала возрастает, что способствует повышению прочности. Это связано с тем, что макромолекулы хитозана содержат большое количество аминогрупп, которые могут участвовать в образовании водородных связей и электростатических взаимодействий с другими компонентами матрицы. Это приводит к образованию более плотной пространственной структуры, которая усиливает механические свойства пленки. Аналогичные результаты были получены в работах (Jridi et al., 2014; Hosseini et al., 2013; Xu, 2025).

При анализе пластических свойств выявлено обратное соотношение между прочностью и удлинением при разрыве: с ростом содержания хитозана и увеличением прочности пленок наблюдается снижение относительного удлинения при разрыве (рис. 4, б). Наибольшее снижение пластичности отмечено для образцов 3 и 4, пластифицированных сорбитолом (94 и 52 % соответственно), что коррелирует с их максимальной прочностью. Более жесткая структура, формируемая сорбитолом и хитозаном, ограничивает способность материала к деформации. Образцы 1 и 2, пластифицированные глицерином, демонстрируют более высокие значения удлинения при разрыве при сопоставимом содержании хитозана: 120 и 87 % соответственно. Пластифицирующие свойства глицерина частично компенсируют жесткость хитозановой матрицы, сохраняя эластичность пленки.

Количественный анализ механических свойств биополимерных пленок позволяет установить корреляцию с данными ИК-спектроскопии, отражающими структурные изменения на молекулярном уровне. Сдвиги характеристических частот и изменения относительной интенсивности полос Амид А и Амид I-III (рис. 3) свидетельствуют о реорганизации сети водородных связей и перераспределении межмолекулярных взаимодействий. Эти процессы непосредственно определяют изменения механических параметров пленок (прочности и относительного удлинения).

Ключевую роль в обеспечении сохранности пищевой продукции играют также барьерные свойства упаковочных материалов, которые количественно оцениваются по показателям паропроницаемости и влагопоглощения, поскольку они лимитируют массоперенос влаги и кислорода, тем самым ингибируя окислительные реакции, потерю влаги и микробную контаминацию, что позволяет продлить сроки хранения и сохранить свойства продукта (*Reji et al.*, 2025).

Паропроницаемость пленок исследовали гравиметрическим методом, основанном на определении количества водяного пара, проходящего через материал (рис. 5, а). Установлено, что значения паропроницаемости пленок, пластифицированных сорбитолом, превосходят значения для пленок с глицерином в 1,5 раза. Полученные данные коррелируют с результатами морфологического и структурного анализа: пленки с сорбитолом характеризуются более упорядоченной и однородной микроструктурой, что обуславливает меньшую степень аэрации материала. При этом варьирование содержания хитозана в составе пленок не оказывает статистически значимого влияния на величину паропроницаемости. Необходимо отметить, что для материалов, применяемых для производства упаковочных материалов, наиболее предпочтительны низкие показатели пропускаемости водяного пара, необходимые для обеспечения безопасного и длительного хранения пищевых продуктов (*Reji et al.*, 2025). Значения паропроницаемости полученных образцов существенно превосходят аналогичный показатель для пленки из полиэтилена, что является характерной особенностью биополимерных пленок (*Hosseini et al.*, 2013).

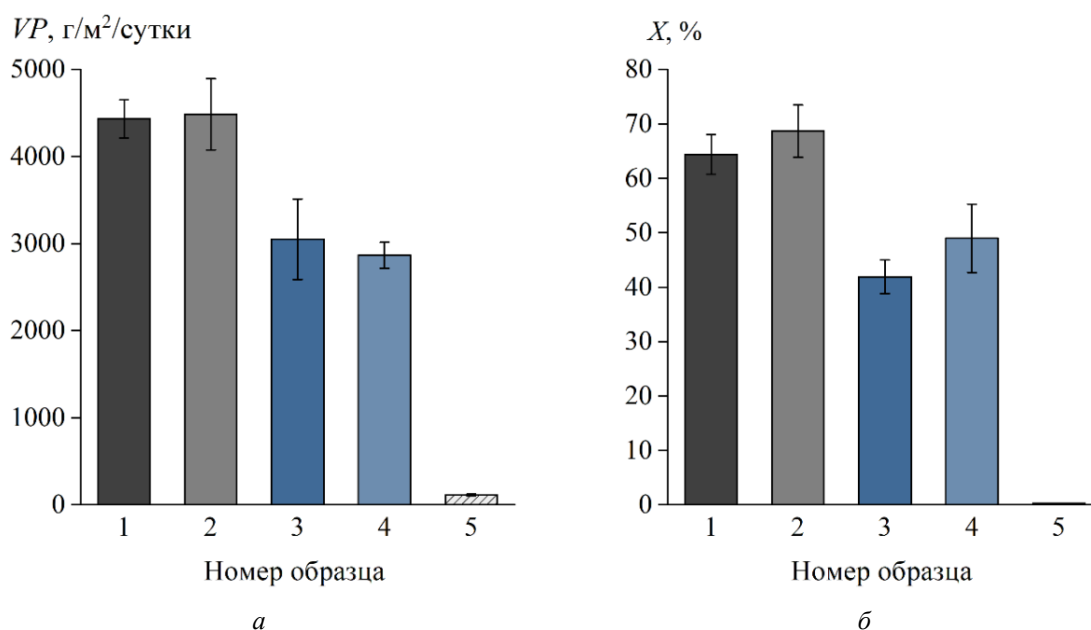


Рис. 5. Паропроницаемость (а) и влагопоглощение (б) образцов пленок (1–4) и пленки из полиэтилена (5)
Fig. 5. Water vapor permeability (a) and water absorption (b) of film samples (1–4) and a polyethylene film (5)

Также исследовано влагопоглощение пленок (рис. 5, б). Пленки, пластифицированные сорбитолом, демонстрируют более низкие показатели влагопоглощения по сравнению с образцами, пластифицированными глицерином. Наблюдаемые различия могут быть связаны с более высокой гидрофильностью глицерина: он легче взаимодействует с водой посредством водородных связей. Кроме того, глицерин из-за меньшего размера частиц обладает значительной способностью взаимодействовать с цепочками желатина, тем самым повышая молекулярную подвижность и увеличивая свободный объем внутри пленок. Таким образом, более гидрофильная природа глицерина и малый молекулярный вес усиливают сродство материалов, пластифицированных им, к воде (*Al-Hassan et al.*, 2012; *Cao et al.*, 2018). Существенного влияния на показатель влагопоглощения содержание хитозана в пленках не оказывает.

При оценке упаковочных материалов существенное значение имеет также температура плавления: она определяет технологические параметры производства (температурные режимы экструзии, термоформования и пр.), эксплуатационную стабильность упаковки при воздействии повышенных температур, а также безопасность при контакте с пищевыми продуктами в условиях термической обработки, транспортировки

и хранения (Shah et al., 2024). На рис. 6 приведены зависимости теплового потока от температуры в режиме динамического нагрева со скоростью 10 °С/мин.

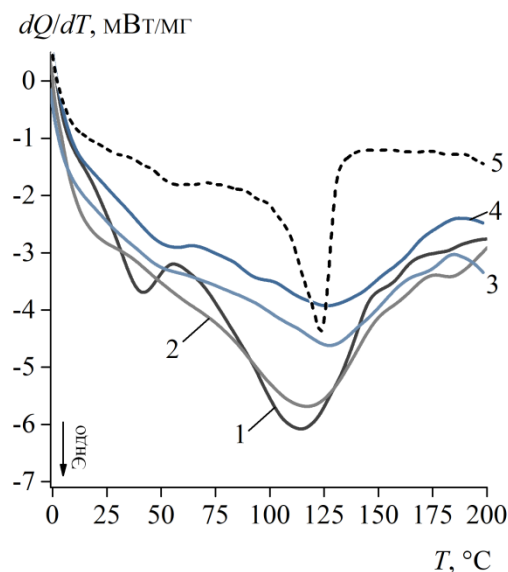


Рис. 6. Термограммы биополимерных пленок (1–4) и пленки из полиэтилена (5)
Fig. 6. Thermograms of biopolymer films (1–4) and a polyethylene film (5)

Анализ полученных термограмм демонстрирует сложное поведение биополимерных пленок в процессе нагрева. Для образцов 1–4 на полученных зависимостях наблюдаются переходы стеклования в области 50–95 °С, указывающие на аморфную структуру материала, за которыми следуют широкие пики плавления. При этом переходы стеклования для образцов 3–4, пластифицированных сорбитолом, смещаются в область более высоких температур. Эндотермические пики, наблюдаемые на кривых нагрева, связаны с плавлением областей биополимеров испарением воды, удерживаемой в матрице пленок.

Установлено, что образцы пленок 1 и 2, пластифицированные глицерином, характеризуются низкими значениями температуры плавления, которые составляют 114 и 117 °С соответственно (табл. 5). Для образцов 3 и 4, модифицированных сорбитолом, характерны более высокие температуры плавления – 128 и 130 °С, что превышает соответствующие показатели для пленок, содержащих глицерин, примерно на 10 °С. Вероятно, наблюдаемые различия могут быть связаны с различным содержанием влаги в пленках (35,6–32,0 % для пленок, пластифицированных глицерином, и 10,2–10,7 % для пленок, пластифицированных сорбитолом). Сорбитол менее гигроскопичен, чем глицерин, поэтому в пленках присутствует меньше свободной влаги, и процесс испарения протекает плавно, а пик плавления менее выражен. Благодаря этому сорбитол обеспечивает большую жесткость и термическую стабильность материала по сравнению с глицерином. Увеличение массовой доли хитозана в составе пленок во всех исследованных образцах приводит к незначительному росту температуры плавления (2–3 °С). Для сравнительной оценки полученных результатов определена температура плавления эталонного образца – пленки из полиэтилена, которая составила 123,7 °С. Таким образом, образцы пленок 3 и 4, пластифицированные сорбитолом, превосходят традиционную упаковочную пленку на основе полиэтилена по термической стойкости.

Таблица 5. Термические свойства пленок
Table 5. Thermal properties of films

Образец	Состав образца	$T_{нач}, ^\circ\text{C}$	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$T_{кон}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{пл}, \text{Дж/г}$
1	70 % ИХС ^а + 26 % ХТЗ ^б + 4 % Г ^в	82,1	114,4	143,4	81,8
2	60 % ИХС ^а + 37 % ХТЗ ^б + 3 % Г ^в	84,2	117,1	151,0	137,4
3	70 % ИХС ^а + 26 % ХТЗ ^б + 4 % С ^г	70,7	128,3	172,7	47,5
4	60 % ИХС ^а + 37 % ХТЗ ^б + 3 % С ^г	99,2	130,4	158,4	44,1
5	Полиэтилен	114,0	123,7	129,9	77,6

Примечание. а – иктиосубстанция, б – хитозан, в – глицерин, г – сорбитол.

Необходимо отметить, что полиэтилен плавится в более узком температурном диапазоне – от 114,0 до 129,9 °С, в то время как диапазоны плавления биополимерных пленок, пластифицированных сорбитолом и глицерином, существенно шире и лежат в области 82–117 и 71–130 °С соответственно (табл. 5).

Кристаллические области полиэтилена достаточно однородны, при нагреве происходит постепенное разрушение кристаллитов, но общая структура материала резко изменяется только в момент плавления. Кроме того, полиэтилен является монокомпонентной системой, в которой отсутствуют водородные связи, и тепловые эффекты преимущественно связаны с фазовым переходом "твердое тело – жидкость" (*Serra et al., 2000*). Образцы биоразлагаемых пленок, напротив, представляют собой сложную многокомпонентную систему, при нагревании которой фазовый переход происходит в более широком температурном интервале. Биополимеры (желатин, хитозан) более чувствительны к температуре, чем полиэтилен. При нагреве они могут подвергаться денатурации и разрушению структуры. При этом желатин и хитозан образуют полиэлектролитные комплексы, что также усложняет термическое поведение системы (*Jridi et al., 2014*).

Исследована биоразлагаемость полученных биополимерных пленок в почве. При изучении разложения пленок на поверхности почвы уже на 5 сутки наблюдалось изменение цвета и помутнение пленок (рис. 7). Кроме того, пленки уменьшились в размере и истончились. На 20 сутки наблюдения на поверхности пленок было отмечено разрастание мицелия (рис. 8). В толще грунта на 20 сутки фрагменты пленок не визуализировались. Таким образом, можно сделать вывод о том, что пленки являются биоразлагаемыми, поскольку наблюдаются визуальные признаки биодеструкции под действием микробиоты почвы, снижение физических свойств и наличие протекания микробиологических процессов (разрастание мицелия на поверхности пленок).



Рис. 7. Внешний вид пленок на 5 сутки хранения на поверхности грунта
Fig. 7. Film appearance after 5 days stored on soil surface

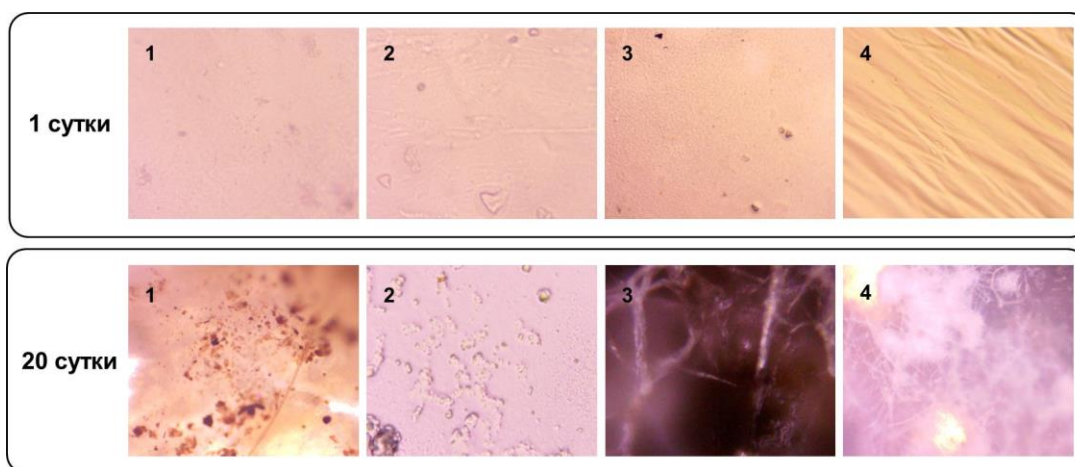


Рис. 8. Микрофотографии пленок (образцы 1–4) до и на 20 сутки хранения на поверхности грунта.
Увеличение – 40X
Fig. 8. Microphotographs of films (samples 1–4) before and after 20 days stored on soil surface.
Magnification – 40X

Заключение

В работе получена коллагенсодержащая ихтиосубстанция из отходов переработки атлантической трески – кожи и чешуи, выход ихтиосубстанции составил 72 %. Методом ПААГ-электрофореза установлено содержание основных молекулярных фракций в ихтиосубстанции: 200, 117, 100 и 89 кДа. Разработана серия образцов биоразлагаемых пищевых пленок на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции из отходов трески с добавлением хитозана и различных пластификаторов (глицерина и сорбитола). Проведен комплексный анализ микроструктуры, физико-химических, механических, барьерных и термических свойств полученных материалов, а также оценена их способность к разложению в почве. Установлено, что использование сорбитола в качестве пластификатора способствует формированию более однородных, прочных и термически стойких пленок, а также обеспечивает более низкие показатели паропроницаемости и влагопоглощения. Аналогичные закономерности наблюдаются и при увеличении содержания хитозана в исследуемых системах.

Таким образом, варьирование типа пластификатора и концентрации хитозана позволяет целенаправленно регулировать барьерные и механические свойства биополимерных пленок.

Разработанные биоразлагаемые пленки обладают рядом улучшенных свойств по сравнению с традиционными синтетическими аналогами: повышенной прочностью, регулируемой эластичностью, удовлетворительными барьерными характеристиками и способностью к биоразложению. Оптимальные показатели достигнуты для образца 4 (состав: 60 % ИХС + 37 % ХТЗ + 3 % С), который сочетает высокую прочность $12,1 \pm 1,1$ МПа и термостойкость ($T_{пл} = 130,4$ °С), а также лучшие барьерные свойства среди исследованных образцов биополимерных пленок: паропроницаемость – $2\,819 \pm 148$ г/м²/сут и влагопоглощение $49,0 \pm 6,3$ %/сут, что связано с формированием наиболее упорядоченной и равномерной микроструктуры.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования коллагенсодержащей ихтиосубстанции из отходов трески в качестве основы для экологичной пищевой упаковки. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию композиции биополимерных пленок для снижения влагопоглощения и повышения барьерных свойств, а также на масштабирование технологии производства с учетом экономической эффективности и устойчивого использования рыбных отходов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР FENR-2024-0001 (рег. № 1023041300048-6-2.9.1) "Комплексная безотходная переработка биоресурсов арктического региона, развитие биотехнологий в Арктике, обеспечение продовольственной безопасности и повышение качества жизни (продолжение)". Авторы выражают благодарность Нижник Варваре Алексеевне (МБОУ ЗАТО г. Североморск "Лицей № 1") за помощь в проведении экспериментальной части работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Еремеева С. В., Сергазиева О. Д., Сопрунова О. Б., Жукова О. И. [и др.]. Влияние биоразлагаемой ихтиожелатиновой пленки на качество мясных полуфабрикатов при хранении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2023. Т. 11, № 3. С. 64–74. DOI: <https://doi.org/10.14529/food230308>. EDN: YUIPIF.
- Казакова В. С., Землякова Е. С. Исследования по комплексной переработке коллагенсодержащего рыбного сырья // Известия КГТУ. 2024. № 72. С. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2024-72-81-91>.
- Олдырев Д. В., Сергазиева О. Д., Ярцева Н. В., Бахарева А. А. Получение коллагенсодержащей ихтиосубстанции из вторичных рыбных ресурсов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 3. С. 182–198. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.451>. EDN: KRZPYR.
- Сергазиева О. Д., Еремеева С. В., Олдырев Д. В. Обоснование увеличения срока годности продуктов, хранящихся в пищевой пленке на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции // Хранение и переработка сельхозсырья. 2025. Т. 33, № 2. С. 185–204. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.651>. EDN: XEUJZG.
- Abugoch L. E., Tapia C., Villamán M. C., Yazdani-Pedram M. [et al.]. Characterization of quinoa protein-chitosan blend edible films // Food Hydrocolloids. 2011. Vol. 25, Iss. 5. P. 879–886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.08.008>.
- Al-Hassan A. A., Norziah M. H. Starch-gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers // Food Hydrocolloids. 2012. Vol. 26, Iss. 1. P. 108–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.015>.
- Cao L., Liu W., Wang L. Developing a green and edible film from Cassia gum: The effects of glycerol and sorbitol // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 175. P. 276–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.064>.
- Derkach S. R., Kuchina Y. A., Baryshnikov A. V., Kolotova D. S. [et al.]. Tailoring cod gelatin structure and physical properties with acid and alkaline extraction // Polymers. 2019. Vol. 11, Iss. 10. Article number: 1724. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101724>.
- Derkach S., Voron'ko N., Bordiyan V., Dyakina T. [et al.]. Influence of chitosan on fish gelatin hydrogel: Rheological properties and microstructure // Polysaccharides. 2025. Vol. 6, Iss. 4. Article number: 110. DOI: <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6040110>.
- Gómez-Guillén M. C., Pérez-Mateos M., Gómez-Estaca J., López-Caballero E. [et al.]. Fish gelatin: A renewable material for developing active biodegradable films // Trends in Food Science & Technology. 2009. Vol. 20, Iss. 1. P. 3–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.10.002>.
- He B., Gao Y., Lou W., Wang J. [et al.]. Biodegradable food packaging films: Material source, mechanical and water vapor barrier properties, and improvement strategies – A comprehensive review // Food Research International. 2025. Vol. 211. Article number: 116431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116431>.

- Hosseini S. F., Rezaei M., Zandi M., Ghavi F. F. Preparation and functional properties of fish gelatin-chitosan blend edible films // *Food Chemistry*. 2013. Vol. 136, Iss. 3–4. P. 1490–1495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.081>.
- Jridi M., Hajji S., Ben Ayed H., Lassoued I. [et al.]. Physical, structural, antioxidant and antimicrobial properties of gelatin-chitosan composite edible films // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2014. Vol. 67. P. 373–379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.03.054>.
- Kumar A., Kumar A., Wei S., Chopra S. [et al.]. Biodegradable and smart packaging films for food quality and safety: A review // *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5, Iss. 2. Article number: 101491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101491>.
- Layne E. Spectrophotometric and turbidimetric methods for measuring proteins // *Methods in Enzymology*. Academic Press, 1957. Vol. 3. P. 447–454. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(57\)03413-8](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(57)03413-8).
- Li C., Yang Y., Zhang R., Wang J. [et al.]. Chitosan-gelatin composite hydrogel antibacterial film for food packaging // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 285. Article number: 138330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138330>.
- Liu X., Qin Z., Ma Y., Liu H. [et al.]. Cellulose-based films for food packaging applications: Review of preparation, properties, and prospects // *Journal of Renewable Materials*. 2023. Vol. 11, Iss. 8. P. 3203–3225. DOI: <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.027613>.
- Liyanapathirana A., Dassanayake R. S., Gamage A., Karri R. R. [et al.]. Recent developments in edible films and coatings for fruits and vegetables // *Coatings*. 2023. Vol. 13, Iss. 7. Article number: 1177. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13071177>.
- Ma X., Qiao C., Zhang J., Xu J. Effect of sorbitol content on microstructure and thermal properties of chitosan films // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018. Vol. 119. P. 1294–1297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.060>.
- Ncube L. K., Ude A. U., Ogunmuyiwa E. N., Zulkifli R. [et al.]. An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries // *Recycling*. 2021. Vol. 6, Iss. 1. Article number: 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>.
- Onyeaka H., Obileke K., Makaka G., Nwokolo N. Current research and applications of starch-based biodegradable films for food packaging // *Polymers*. 2022. Vol. 14, Iss. 6. Article number: 1126. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14061126>.
- Pereda M., Ponce A. G., Marcovich N. E., Ruseckaite R. A. [et al.]. Chitosan-gelatin composites and bi-layer films with potential antimicrobial activity // *Food Hydrocolloids*. 2011. Vol. 25, Iss. 5. P. 1372–1381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.01.001>.
- Pranoto Y., Lee C. M., Park H. J. Characterizations of fish gelatin films added with gellan and κ -carrageenan // *LWT – Food Science and Technology*. 2007. Vol. 40, Iss. 5. P. 766–774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.04.005>.
- Rajendran D. S., Venkataraman S., Jha S. K., Chakrabarty D. [et al.]. A review on bio-based polymer polylactic acid potential on sustainable food packaging // *Food Science and Biotechnology*. 2024. Vol. 33. P. 1759–1788. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01543-x>.
- Ramos M., Valdés A., Beltrán A., Garrigós M. C. Gelatin-based films and coatings for food packaging applications // *Coatings*. 2016. Vol. 6, Iss. 4. Article number: 41. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings6040041>.
- Reji R. E., Mathew C. B., Janani V., Sabu C. S. [et al.]. A review on gelatin films and coatings for active food packaging: Functional properties and applications // *Food Innovation and Advances*. 2025. Vol. 4, Iss. 3. P. 423–436. DOI: <https://doi.org/10.48130/fia-0025-0046>.
- Rivero S., García M. A., Pinotti A. Composite and bi-layer films based on gelatin and chitosan // *Journal of Food Engineering*. 2009. Vol. 90, Iss. 4. P. 531–539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.021>.
- Robles-Vargas D., Santos-Medrano G. E., Alvarado-Flores J., Pérez-Legaspi I. A. [et al.]. Accumulation of plastic waste in the natural environment and its life cycle assessment // *Environmental Hazards of Plastic Wastes. Bioremediation Approaches for Environmental Clean-up* / eds.: R. T. Kapoor, H. Treichel, J. Zdarta. Elsevier, 2025. Chapter 15. P. 235–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23599-3.00022-8>.
- Rosmawati R., Sari S. F., Asnani A., Embe W. [et al.]. Influence of sorbitol and glycerol on physical and tensile properties of biodegradable-edible film from snakehead gelatin and κ -carrageenan // *International Journal of Food Science*. 2025. Vol. 2025, Iss. 1. Article number: 7568352. DOI: <https://doi.org/10.1155/ijfo/7568352>.
- Rostamabadi H., Demirkesen I., Colussi R., Roy S. [et al.]. Recent trends in the application of films and coatings based on starch, cellulose, chitin, chitosan, xanthan, gellan, pullulan, Arabic gum, alginate, pectin, and carrageenan in food packaging // *Food Frontiers*. 2024. Vol. 5, Iss. 2. P. 350–391. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.342>.
- Serra S., Iarlari S., Tosatti E., Scandolo S. [et al.]. Dynamical and thermal properties of polyethylene by ab initio simulation // *Chemical Physics Letters*. 2000. Vol. 331, Iss. 2–4. P. 339–345. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(00\)00881-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(00)00881-2).

- Shah Y. A., Bhatia S., Al-Harrasi A., Oz F. [et al.]. Thermal properties of biopolymer films: Insights for sustainable food packaging applications // *Food Engineering Reviews*. 2024. Vol. 16. P. 497–512. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09380-8>.
- Shaikh S., Yaqoob M., Aggarwal P. An overview of biodegradable packaging in food industry // *Current Research in Food Science*. 2021. Vol. 4. P. 503–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.005>.
- Sheriff S. S., Yusuf A. A., Akiyode O. O., Hallie E. F. [et al.]. A comprehensive review on exposure to toxins and health risks from plastic waste: Challenges, mitigation measures, and policy interventions // *Waste Management Bulletin*. 2025. Vol. 3, Iss. 3. Article number: 100204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100204>.
- Sionkowska A., Wisniewski M., Skopinska J., Kennedy C. J. [et al.]. Molecular interactions in collagen and chitosan blends // *Biomaterials*. 2004. Vol. 25, Iss. 5. P. 795–801. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00595-7](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00595-7).
- Staroszczyk H., Pielichowska J., Sztuka K., Stangret J. [et al.]. Molecular and structural characteristics of cod gelatin films modified with EDC and TGase // *Food Chemistry*. 2012. Vol. 130, Iss. 2. P. 335–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.047>.
- Staroszczyk H., Sztuka K., Wolska J., Wojtasz-Pająk A. [et al.]. Interactions of fish gelatin and chitosan in uncrosslinked and crosslinked with EDC films: FT-IR study // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2014. Vol. 117. P. 707–712. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.09.044>.
- Voron'ko N. G., Derkach S. R., Kuchina Y. A., Sokolan N. I. The chitosan – gelatin (bio)polyelectrolyte complexes formation in an acidic medium // *Carbohydrate Polymers*. 2016. Vol. 138. P. 265–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.059>.
- Xu X.-F., Dai M.-Q., Yan J.-N., Du Y.-N. [et al.]. Comparison of the properties of composite films constructed from chitosan and gelatin from two jellyfish species // *Food Hydrocolloids*. 2025. Vol. 167. Article number: 111412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111412>.
- Zubair M., Ullah A. Recent advances in protein derived bionanocomposites for food packaging applications // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. Vol. 60, Iss. 3. P. 406–434. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1534800>.

References

- Eremeeva, S. V., Sergazieva, O. D., Soprunova, O. B., Zhukova, O. I. et al. 2023. The effect of biodegradable ichthyogelatin film on the quality of meat semi-finished products during storage. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 11(3), pp. 64–74. DOI: <https://doi.org/10.14529/food230308>. EDN: YUIPIF. (In Russ.)
- Kazakova, V. S., Zemlyakova, E. S. 2024. Integrated processing of collagen-containing fish raw materials. *KSTU News*, 72, pp. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2024-72-81-91>. (In Russ.)
- Oldyrev, D. V., Sergazieva, O. D., Yartseva, N. V., Bakhareva, A. A. 2023. Producing collagen-containing ichthyosubstance from secondary fishery resources. *Storage and Processing of Farm Products*, 3, pp. 182–198. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.451>. EDN: KRZPYR. (In Russ.)
- Sergazieva, O. D., Eremeeva, S. V., Oldyrev, D. V. 2025. Justification for the extension of shelf life of products stored in a collagen-containing ichthyosubstance-based food film. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(2), pp. 185–204. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.651>. EDN: XEUJZG. (In Russ.)
- Abugoch, L. E., Tapia, C., Villamán, M. C., Yazdani-Pedram, M. et al. 2011. Characterization of quinoa protein-chitosan blend edible films. *Food Hydrocolloids*, 25(5), pp. 879–886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.08.008>.
- Al-Hassan, A. A., Norziah, M. H. 2012. Starch-gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers. *Food Hydrocolloids*, 26(1), pp. 108–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.015>.
- Cao, L., Liu, W., Wang, L. 2018. Developing a green and edible film from Cassia gum: The effects of glycerol and sorbitol. *Journal of Cleaner Production*, 175, pp. 276–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.064>.
- Derkach, S. R., Kuchina, Y. A., Baryshnikov, A. V., Kolotova, D. S. et al. 2019. Tailoring cod gelatin structure and physical properties with acid and alkaline extraction. *Polymers*, 11(10). Article number: 1724. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101724>.
- Derkach, S., Voron'ko, N., Bordiyan, V., Dyakina, T. et al. 2025. Influence of chitosan on fish gelatin hydrogel: Rheological properties and microstructure. *Polysaccharides*, 6(4). Article number: 110. DOI: <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6040110>.
- Gómez-Guillén, M. C., Pérez-Mateos, M., Gómez-Estaca, J., López-Caballero, E. et al. 2009. Fish gelatin: A renewable material for developing active biodegradable films. *Trends in Food Science & Technology*, 20(1), pp. 3–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.10.002>.
- He, B., Gao, Y., Lou, W., Wang, J. et al. 2025. Biodegradable food packaging films: Material source, mechanical and water vapor barrier properties, and improvement strategies – A comprehensive review. *Food Research International*, 211. Article number: 116431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116431>.

- Hosseini, S. F., Rezaei, M., Zandi, M., Ghavi, F. F. 2013. Preparation and functional properties of fish gelatin-chitosan blend edible films. *Food Chemistry*, 136(3–4), pp. 1490–1495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.081>.
- Jridi, M., Hajji, S., Ben Ayed, H., Lassoued, I. et al. 2014. Physical, structural, antioxidant and antimicrobial properties of gelatin-chitosan composite edible films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 67, pp. 373–379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.03.054>.
- Kumar, A., Kumar, A., Wei, S., Chopra, S. et al. 2025. Biodegradable and smart packaging films for food quality and safety: A review. *Applied Food Research*, 5(2). Article number: 101491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101491>.
- Layne, E. 1957. Spectrophotometric and turbidimetric methods for measuring proteins. *Methods in Enzymology*. Academic Press, 3, pp. 447–454. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(57\)03413-8](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(57)03413-8).
- Li, C., Yang, Y., Zhang, R., Wang, J. et al. 2025. Chitosan-gelatin composite hydrogel antibacterial film for food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 285. Article number: 138330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138330>.
- Liu, X., Qin, Z., Ma, Y., Liu, H. et al. 2023. Cellulose-based films for food packaging applications: Review of preparation, properties, and prospects. *Journal of Renewable Materials*, 11(8), pp. 3203–3225. DOI: <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.027613>.
- Liyanapathirana, A., Dassanayake, R. S., Gamage, A., Karri, R. R. et al. 2023. Recent developments in edible films and coatings for fruits and vegetables. *Coatings*, 13(7). Article number: 1177. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13071177>.
- Ma, X., Qiao, C., Zhang, J., Xu, J. 2018. Effect of sorbitol content on microstructure and thermal properties of chitosan films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, pp. 1294–1297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.060>.
- Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R. et al. 2021. An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries. *Recycling*, 6(1). Article number: 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>.
- Onyeaka, H., Obileke, K., Makaka, G., Nwokolo, N. 2022. Current research and applications of starch-based biodegradable films for food packaging. *Polymers*, 14(6). Article number: 1126. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14061126>.
- Pereda, M., Ponce, A. G., Marcovich, N. E., Ruseckaite R. A. et al. 2011. Chitosan-gelatin composites and bi-layer films with potential antimicrobial activity. *Food Hydrocolloids*, 25(5), pp. 1372–1381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.01.001>.
- Pranoto, Y., Lee, C. M., Park, H. J. 2007. Characterizations of fish gelatin films added with gellan and κ -carrageenan. *LWT – Food Science and Technology*, 40(5), pp. 766–774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.04.005>.
- Rajendran, D. S., Venkataraman, S., Jha, S. K., Chakrabarty, D. et al. 2024. A review on bio-based polymer polylactic acid potential on sustainable food packaging. *Food Science and Biotechnology*, 33, pp. 1759–1788. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01543-x>.
- Ramos, M., Valdés, A., Beltrán, A., Garrigós, M. C. 2016. Gelatin-based films and coatings for food packaging applications. *Coatings*, 6(4). Article number: 41. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings6040041>.
- Reji, R. E., Mathew, C. B., Janani, V., Sabu, C. S. et al. 2025. A review on gelatin films and coatings for active food packaging: Functional properties and applications. *Food Innovation and Advances*, 4(3), pp. 423–436. DOI: <https://doi.org/10.48130/fia-0025-0046>.
- Rivero, S., García, M. A., Pinotti A. 2009. Composite and bi-layer films based on gelatin and chitosan. *Journal of Food Engineering*, 90(4), pp. 531–539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.021>.
- Robles-Vargas, D., Santos-Medrano, G. E., Alvarado-Flores, J., Pérez-Legaspi, I. A. et al. 2025. Accumulation of plastic waste in the natural environment and its life cycle assessment. In *Environmental Hazards of Plastic Wastes. Bioremediation Approaches for Environmental Clean-up*. Eds.: R. T. Kapoor, H. Treichel, J. Zdarta. Elsevier, Chapter 15, pp. 235–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23599-3.00022-8>.
- Rosmawati, R., Sari, S. F., Asnani, A., Embe, W. et al. 2025. Influence of sorbitol and glycerol on physical and tensile properties of biodegradable-edible film from snakehead gelatin and κ -carrageenan. *International Journal of Food Science*, 2025(1). Article number: 7568352. DOI: <https://doi.org/10.1155/ijfo/7568352>.
- Rostamabadi, H., Demirkesen, I., Colussi, R., Roy, S. et al. 2024. Recent trends in the application of films and coatings based on starch, cellulose, chitin, chitosan, xanthan, gellan, pullulan, Arabic gum, alginate, pectin, and carrageenan in food packaging. *Food Frontiers*, 5(2), pp. 350–391. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.342>.
- Serra, S., Iarlori, S., Tosatti, E., Scandolo, S. et al. 2000. Dynamical and thermal properties of polyethylene by ab initio simulation. *Chemical Physics Letters*, 331(2–4), pp. 339–345. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(00\)00881-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(00)00881-2).
- Shah, Y. A., Bhatia, S., Al-Harrasi, A., Oz, F. et al. 2024. Thermal properties of biopolymer films: Insights for sustainable food packaging applications. *Food Engineering Reviews*, 16, pp. 497–512. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09380-8>.

- Shaikh, S., Yaqoob, M., Aggarwal, P. 2021. An overview of biodegradable packaging in food industry. *Current Research in Food Science*, 4, pp. 503–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.005>.
- Sheriff, S. S., Yusuf, A. A., Akiyode, O. O., Hallie, E. F. et al. 2025. A comprehensive review on exposure to toxins and health risks from plastic waste: Challenges, mitigation measures, and policy interventions. *Waste Management Bulletin*, 3(3). Article number: 100204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100204>.
- Sionkowska, A., Wisniewski, M., Skopinska, J., Kennedy, C. J. et al. 2004. Molecular interactions in collagen and chitosan blends. *Biomaterials*, 25(5), pp. 795–801. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00595-7](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00595-7).
- Staroszczyk, H., Pielichowska, J., Sztuka, K., Stangret, J. et al. 2012. Molecular and structural characteristics of cod gelatin films modified with EDC and TGase. *Food Chemistry*, 130(2), pp. 335–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.047>.
- Staroszczyk, H., Sztuka, K., Wolska, J., Wojtasz-Pajak, A. et al. 2014. Interactions of fish gelatin and chitosan in uncrosslinked and crosslinked with EDC films: FT-IR study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 117, pp. 707–712. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.09.044>.
- Voron'ko, N. G., Derkach, S. R., Kuchina, Y. A., Sokolan, N. I. 2016. The chitosan – gelatin (bio)polyelectrolyte complexes formation in an acidic medium. *Carbohydrate Polymers*, 138, pp. 265–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.059>.
- Xu, X.-F., Dai, M.-Q., Yan, J.-N., Du, Y.-N. et al. 2025. Comparison of the properties of composite films constructed from chitosan and gelatin from two jellyfish species. *Food Hydrocolloids*, 167. Article number: 111412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111412>.
- Zubair, M., Ullah, A. 2020. Recent advances in protein derived bionanocomposites for food packaging applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(3), pp. 406–434. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1534800>.

Сведения об авторах

Колотова Дарья Сергеевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: kolotovads@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>

Daria S. Kolotova – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher;
e-mail: kolotovads@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>

Воропаева Светлана Олеговна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, мл. науч. сотрудник;
e-mail: voropaevaso@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0230-2690>

Svetlana O. Voropaeva – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Junior Researcher;
e-mail: voropaevaso@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0230-2690>

Петрова Людмила Анатольевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: petrovala@mauniver.ru

Liudmila A. Petrova – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: petrovala@mauniver.ru

УДК 543.645.6

Исследование биологически активных пептидов, полученных из гидролизатов изолята белков нута и рапса

А. А. Мижева, И. А. Фоменко, И. М. Чернуха, Ф. В. Подобуев*

*Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Россия;
e-mail: fedorpod@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9551-2824>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
28.05.2026;

получена
после доработки
24.06.2026;

принята
к публикации
29.06.2026

Ключевые слова:

пептиды,
гидролиз,
рапс,
нут,
ферменты,
биологическая
активность,
протеомика

Растительные белки являются перспективным источником биологически активных пептидов, обладающих широким спектром физиологического действия, что обуславливает актуальность их изучения для получения функциональных продуктов и фармацевтических препаратов. В работе представлены результаты ферментативного гидролиза изолятов белков нута и рапса с использованием коммерческих ферментных препаратов "Alcalase 2.4 L FG", "Neutrase 0.8 L", "Flavourzyme 1000 L", "Пепсин" и "Трипсин". Установлено, что наиболее интенсивная деградация обоих субстратов происходит в первые 60 минут протеолиза, при этом максимальная степень гидролиза наблюдается при использовании "Alcalase 2.4 L FG". Методом ВЭЖХ-МС/МС суммарно идентифицировано 56 635 пептидов в нуте и 48 780 последовательностей в рапсе. Из общего пула в зависимости от фермента было отобрано от 22 до 37 мажорных пептидов в нуте и от 24 до 60 последовательностей для рапса. Биоинформатический анализ показал, что доминирующими классами биологической активности являются ингибиторы АПФ и DPP-IV, были выявлены противоопухолевая, антиоксидантная и антибактериальная активности. С использованием программы "ЭкспТеоПеп" проведено экспериментальное сравнение сходности экспериментальных пептидных профилей с теоретическими *in silico* гидролизатами. Средний процент сходности составил 19,4 % для нута и 23,4 % для рапса. Выявлено 6 пептидов с процентом сходности более 80 %, причем один из них показал сходность 100 %. Оценка воспроизводимости пептидного состава на примере двух независимых гидролизатов рапса, полученных в идентичных условиях с применением "Alcalase 2.4 L FG", выявила сходность 82 % и полную идентичность 21 мажорной последовательности из 32, что подтверждает высокую воспроизводимость основного пептидного профиля. Полученные результаты будут использованы для последующего молекулярного докинга, химического синтеза отобранных пептидов и подтверждения их биологической активности на клеточных системах.

Для цитирования

Мижева А. А. и др. Исследование биологически активных пептидов, полученных из гидролизатов изолята белков нута и рапса. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 335–346. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-335-346>.

Analysis of bioactive peptides derived from hydrolysates of chickpea and rapeseed protein isolates

Aislu A. Mizheva, Ivan A. Fomenko, Irina M. Chernukha, Fedor V. Podobuev*

*Russian University of Biotechnology (ROSBIOTECH), Moscow, Russia;
e-mail: fedorpod@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9551-2824>

Article info

Received
28.05.2026;

received
in revised form
24.06.2026;

accepted
29.06.2026

Key words:

peptides,
hydrolysis,
rapeseed,
chickpea,
enzymes,
biological activity,
proteomics

Abstract

Plant proteins are a promising source of bioactive peptides with a wide range of physiological effects, which makes their study relevant for functional foods and pharmaceuticals. This paper presents the results of enzymatic hydrolysis of chickpea and rapeseed protein isolates using commercial enzymes Alcalase 2.4 L FG, Neutrase 0.8 L, Flavourzyme 1000 L, Pepsin, and Trypsin. The most intensive degradation of both substrates occurs during the first 60 minutes of proteolysis, with the maximum degree of hydrolysis achieved with Alcalase 2.4 L FG. Using HPLC–MS/MS, total of 56,635 peptides have been identified in chickpea hydrolysates and 48,780 in rapeseed hydrolysates. Depending on the enzyme, 22 to 37 major peptides are selected from chickpea and 24 to 60 from rapeseed. Bioinformatic analysis has shown that the dominant classes of biological activity are ACE and DPP-IV inhibitors; anticancer, antioxidant, and antibacterial activities are detected. Using ExpTeoPep software, experimental peptide profiles have been compared with theoretical *in silico* hydrolysates. The average matching rate is 19.4 % for chickpea and 23.4 % for rapeseed. Six peptides show more than 80 % matching, one reaching 100 %. Reproducibility of the peptide composition is assessed using two independent rapeseed hydrolysates obtained under identical conditions with Alcalase 2.4 L FG; the matching rate was 82 %, with 21 out of 32 major sequences completely identical, confirming high reproducibility of the core peptide profile. The results will be used for subsequent molecular docking, chemical synthesis of selected peptides, and validation of their biological activity in cell-based systems.

For citation

Mizheva, A. A. et al. 2026. Analysis of bioactive peptides derived from hydrolysates of chickpea and rapeseed protein isolates. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 335–346. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-335-346>.

Введение

Биологически активные пептиды (БАП) представляют собой низкомолекулярные вещества, получаемые из животных или растительных белков путем гидролиза, они обладают гипогликемической, иммуномодулирующей, противовоспалительной (Fan et al., 2022), антиоксидантной, противомикробной и антигипертензивной активностью (Akbarian et al., 2022), могут улучшать память и повышать когнитивные способности (Katayama et al., 2021). Благодаря этим свойствам БАП рассматриваются в качестве функциональных пищевых добавок и средств для лечения и профилактики хронических заболеваний (Cruz-Casas et al., 2021).

Большинство биологически активных пептидов проявляют активность только после высвобождения из белков, поэтому наиболее распространенными и простыми методами их получения являются ферментативный гидролиз и микробная ферментация (Görgüç et al., 2020). Эффективность гидролиза и свойства получаемых пептидов зависят от типа фермента, параметров процесса и исходного сырья (Begum et al., 2023). Ферментативный гидролиз безопасен и управляем: изменение температуры, pH, времени, соотношения фермент/субстрат и использование специфических протеаз позволяет получать пептиды с требуемой активностью. Чаще всего для получения БАП используют ферменты "Пепсин", "Трипсин" и "Алкалаза" (Cruz-Casas et al., 2021), а также "Папаин" и "Бромелаин" (Purohit et al., 2024).

В последние десятилетия растительное сырье привлекает к себе внимание как перспективный источник биологически активных пептидов (Akbarian et al., 2022; Fan et al., 2022; Görgüç et al., 2020). Нут (*Cicer arietinum* L.) и рапс (*Brassica napus* L.) рассматриваются как перспективные субстраты для получения БАП.

Содержание белка в нуте варьируется от 16 до 27 % (Grasso et al., 2022), что позволяет рассматривать его в качестве богатого источника для получения БАП. Ферментативным гидролизом из него могут быть получены пептиды с антигипертензивной, антидиабетической, антиоксидантной, противовоспалительной и антимикробной активностями (Begum et al., 2023). Особый интерес представляет способность пептидов нута к ингибированию ангиотензинпревращающего фермента (АПФ) и дипептидилпептидазы IV (DPP-IV), что позволяет рассматривать их как потенциальные средства для профилактики и лечения гипертензии и сахарного диабета 2 типа.

Рапсовый жмых и шрот, остающийся после переработки семян и являющийся отходом сельского хозяйства, рассматривается как дешевый источник растительных нутриентов. Содержание белка в таком сырье достигает 30–35 % (Bompart et al., 2026). В ходе исследований в рапсе были выявлены пептиды, обладающие антигипертензивной (Duan et al., 2023) и гиполипидемической (Yang et al., 2023) активностями, благодаря чему они имеют потенциал в качестве средств профилактики сердечно-сосудистых заболеваний.

Применение *in silico* методов совместно с эмпирическими исследованиями открывает новые возможности для эффективного скрининга БАП из растительного сырья (Villaró-Cos et al., 2023). Несмотря на значительный прогресс в исследовании биологически активных пептидов, данные о механизмах их действия *in vivo* остаются недостаточно изученными. Необходимы дальнейшие исследования биодоступности и безопасности, а также клинические испытания для подтверждения их терапевтического потенциала.

Научная новизна исследования заключалась в том, что впервые проводилось сопоставление экспериментально идентифицированных последовательностей с теоретическими *in silico* пептидами для оценки сходности расчетных и экспериментальных профилей.

Целью исследования являлось исследование пептидного профиля ферментативных гидролизатов изолятов белков нута и рапса, полученных с использованием коммерческих ферментных препаратов, а также прогнозирование биологической активности образующихся пептидов с помощью *in silico* методов в качестве инструмента предварительного скрининга.

Материалы и методы

Для проведения исследования изолят белка рапса получали в соответствии с патентом РФ № 2815553 (Способ получения..., 2023). Белковый изолят нута был получен согласно патенту РФ № 2803851 (Способ получения..., 2023). Ферментные препараты, использовавшиеся для проведения ферментативного гидролиза изолята белков, а также их основные характеристики представлены в табл. 1.

Гидролиз проводили в 5 % суспензии изолятов белков нута и рапса в течение 40–60 мин с использованием ферментных препаратов в дозировке 1,5 % от массы сухого вещества при температуре и pH, рекомендуемых производителями ФП.

Определение степени гидролиза проводили путем расчета отношения содержания аминного азота к содержанию общего азота в навеске. Аминный азот определяли методом формольного титрования в соответствии с ОФС.1.2.3.0022.15¹, общий азот измеряли по ГОСТ 13496.4-2019².

¹ ОФС.1.2.3.0022.15. Определение аминного азота методами формольного и йодометрического титрования. М., 2015.

² ГОСТ 13496.4–2019. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина. М., 2019.

Для идентификации пептидного состава полученных гидролизатов образцы предварительно обессоливали на микроколонках SDB-RPS StageTip. Обессоленные образцы в объеме 2 мкл загружали на предколону размером 50×0,1 мм, заполненную сорбентом Reprosil-Pur 200 C18-AQ с размером частиц 5 мкм (Dr. Maisch Matrix, Германия), в подвижной фазе, содержащей 98 % воды, 2 % ацетонитрила и 0,1 % ТФУ при скорости потока 4,2 мкл/мин. Обращенно-фазную хроматографию проводили с использованием системы Ultimate 3000 Nano LC System (Thermo Fisher Scientific, США), соединенной с масс-спектрометром Orbitrap Lumos Tribrid Mass Spectrometer (Thermo Fisher Scientific, США). Перед анализом образцов и между ними для верификации воспроизводимости времени выхода пептидов с колонки и чувствительности масс-спектрометра вносили триптический гидролизат цитохрома С в количестве 100 фмоль. Хроматографическое разделение осуществляли с помощью двух растворителей: А (99,9 % воды и 0,1 % муравьиной кислоты) и Б (19,9 % воды, 0,1 % муравьиной кислоты и 80 % ацетонитрила).

Таблица 1. Перечень ферментных препаратов, используемых для ферментативного гидролиза изолята белков
Table 1. List of enzyme preparations used for enzymatic hydrolysis of protein isolates

Коммерческое название ФП	Наименование компании	рН действия	Температура действия, °С	Активность по ГОСТ 34430-2018 ³ , ед. ПС/г
"Alcalase 2.4 L FG"	Novonesis A/S	8,0	45	640 ± 32
"Neutrase 0.8 L"	Novonesis A/S	7,0	45	612 ± 30
"Flavourzyme 1000 L"	Novonesis A/S	7,0	50	607 ± 30
"Пепсин"	HiMedia Laboratories Private Limited	3,0	37	395 ± 20
"Трипсин"	HiMedia Laboratories Private Limited	7,5	37	242 ± 18

Полученные данные масс-спектрометрии обрабатывали с помощью программного обеспечения Peaks studio 11.0 (Bioinformatics Solutions Inc., Канада).

Для прогнозирования потенциальной биологической активности полученных пептидов использовали БД Peptide Ranker (Mooney *et al.*, 2012), позволяющие оценить вероятность пептидов проявлять биологическую активность, БД BIOPEP-UWM (Minkiewicz *et al.*, 2019) для предсказания антиоксидантной активности и ингибирования АНТ и DPP-IV, АНТpin (Kumar *et al.*, 2015) для оценки антигипертензивной активности, ToxinPred (Gupta *et al.*, 2013) для прогнозирования токсичности и AlgPred2 (Sharma *et al.*, 2021) для аллергенности, AntiCP 2.0 (Agrawal *et al.*, 2021) для оценки противоопухолевой активности, AntiBP3 (Bajjiya *et al.*, 2024) для идентификации потенциальных антибактериальных пептидов, AntiTbPred (Usmani *et al.*, 2018) для поиска пептидов с противотуберкулезной активностью и AntiFP (Agrawal *et al.*, 2018) для противогрибковых пептидов. Все прогнозы носили предварительный характер и требуют дальнейшей экспериментальной проверки.

Сравнение экспериментальных и теоретических пептидных последовательностей проводили с использованием программы "ЭкспТеоПеп", выполняющей локальное выравнивание последовательностей по алгоритму Смита – Ватермана. Для каждого экспериментального пептида в отфильтрованной по источнику белка, наименованию белка и ферменту теоретической базе осуществлялся поиск наилучшего совпадения с учетом допустимого числа замен и гэпов. Рассчитывались процент идентичности, покрытие, число замен и гэпов, балл выравнивания. По пулу пептидов определялась общая сходимость (доля экспериментальных пептидов, имеющих соответствие) и средние метрики.

Результаты и обсуждение

Ферментные препараты "Alcalase 2.4 L FG", "Neutrase 0.8 L" и "Flavourzyme 1000 L" выбраны ввиду их высокой гидролитической активности, перспективности получения с их помощью новых биологически активных пептидов, широкой представленностью в аналогичных научных работах и высоким спросом на рынке ферментных препаратов.

Использование трипсина и пепсина обусловлено их ключевой ролью в пищеварении. Это дает возможность косвенно оценить эффективность гидролиза изучаемых белковых изолятов *in vivo*, охарактеризовать пептидный профиль, предсказать потенциальную биоактивность и сопоставить результаты с данными для других коммерческих ФП. Получение гидролизатов с выбранными ферментами осуществляли согласно условиям, представленным в табл. 2.

³ ГОСТ 34430-2018. Ферментные препараты для пищевой промышленности. Метод определения протеолитической активности. М., 2018.

На основании динамики гидролиза наиболее эффективным ферментом оказался "Alcalase 2.4 L FG". При его использовании степень гидролиза нута и рапса составила 18,0 и 19,5 % соответственно. Наиболее интенсивно деструкция изолятов происходила в течение первых 60 мин, после чего реакция замедлялась, при этом рапс лучше подвергался гидролизу.

Таблица 2. Условия получения белковых гидролизатов нута и рапса
Table 2. Conditions for obtaining protein hydrolysates of chickpea and rapeseed

Наименование ФП	Дозировка ФП, %	pH	Температура, °C	Длительность, ч
Нут				
"Alcalase 2.4 L FG"	1,5	8,0	45	0,5–4
"Neutrase 0.8 L"	1,5	7,0	45	0,5–4
"Flavourzyme 1000 L"	1,5	7,0	45	0,5–4
"Пепсин"	1,5	3,0	37	0,5–4
"Трипсин"	1,5	7,5	37	0,5–4
Рапс				
"Alcalase 2.4 L FG"	1,5	8,0	45	0,5–4
"Neutrase 0.8 L"	1,5	7,0	45	0,5–4
"Flavourzyme 1000 L"	1,5	7,0	45	0,5–4
"Пепсин"	1,5	3,0	37	0,5–4
"Трипсин"	1,5	7,5	37	0,5–4

На рис. 1 представлены данные, характеризующие процесс ферментативного гидролиза изолятов белков нута и рапса с использованием выбранных коммерческих ферментных препаратов.

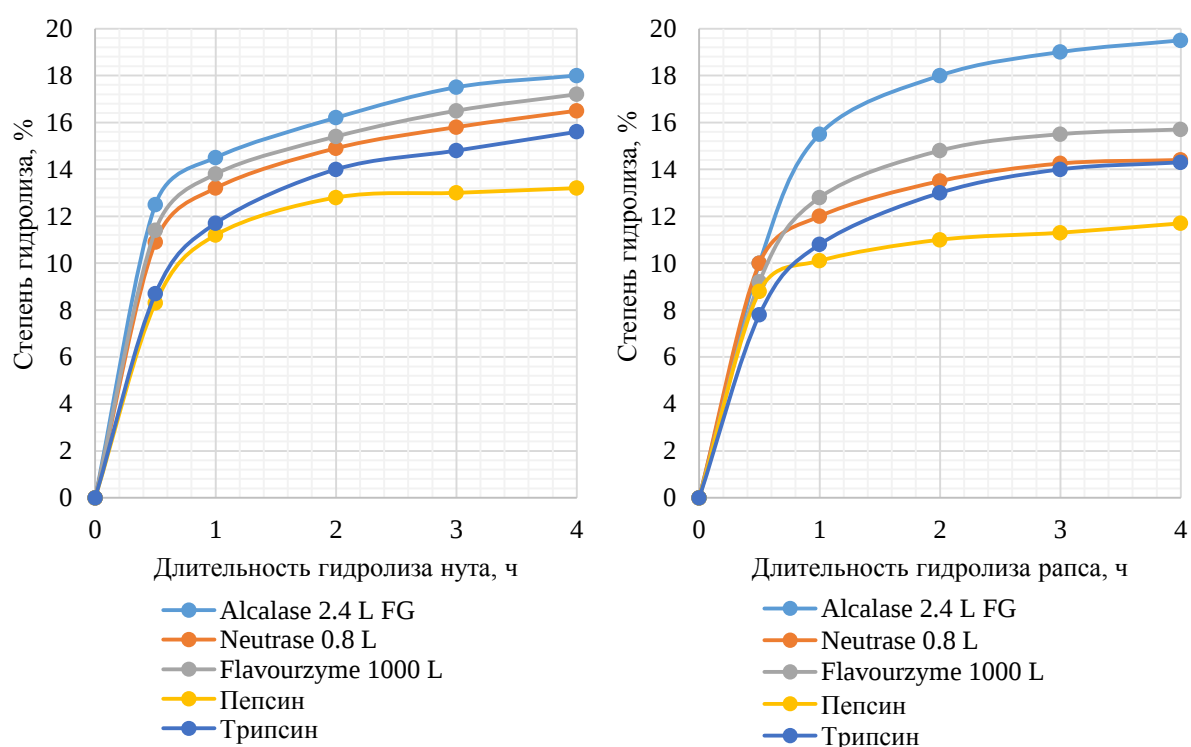
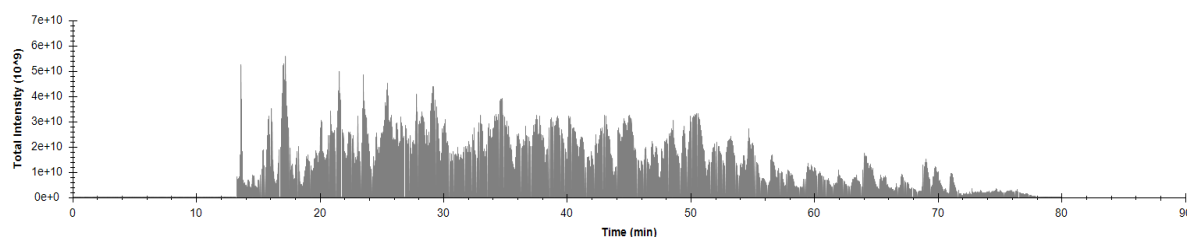


Рис. 1. Динамика ферментативной деструкции изолятов белков нута и рапса с использованием ФП "Alcalase 2.4 L FG", "Neutrase 0.8 L", "Flavourzyme 1000 L", "Пепсин" и "Трипсин"

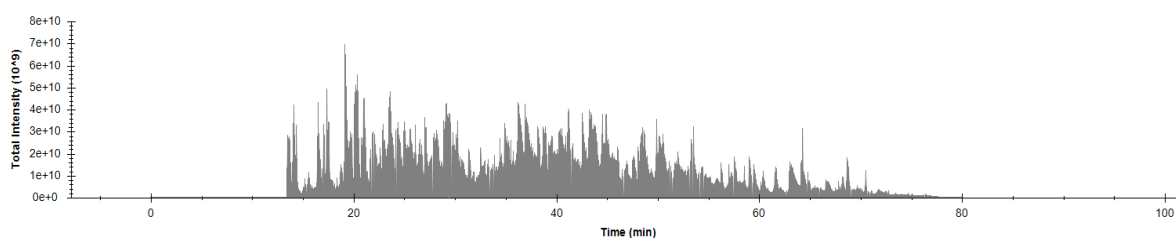
Fig. 1. Dynamics of enzymatic hydrolysis of chickpea and rapeseed protein isolates with Alcalase 2.4 L FG, Neutrase 0.8 L, Flavourzyme 1000 L, Pepsin, and Trypsin

Методом ВЭЖХ-МС/МС в гидролизатах нута и рапса суммарно было идентифицировано 56 635 и 48 780 последовательностей соответственно. В составе гидролизата белка нута было определено 13 123 пептида, полученных с использованием "Alcalase 2.4 L FG", 10 888 пептидов с ФП "Neutrase 0.8 L", 17 018

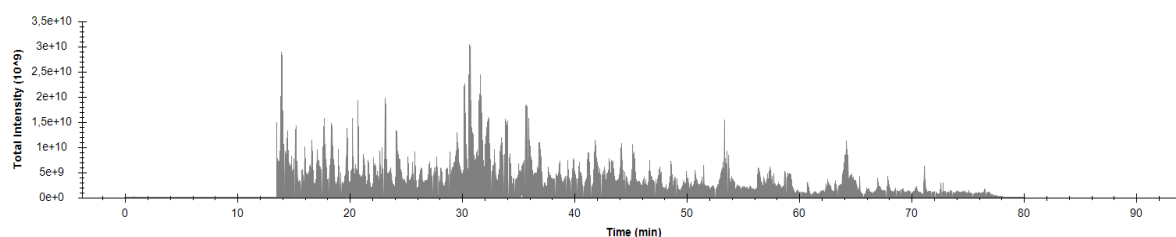
последовательностей с ФП "Flavourzyme 1000 L", 13236 пептидов с использованием ФП "Пепсин" и 2370 пептидов с ФП "Трипсин". Для гидролизата белка рапса наблюдалось следующее распределение: 8606 пептидов – "Alcalase 2.4 L FG", 12533 пептида – "Neutrase 0.8 L", 12625 последовательностей – "Flavourzyme 1000 L", 12355 пептидов – "Пепсин" и 2661 пептид – "Трипсин". Результаты масс-спектрометрии образцов гидролизатов белков нута и рапса представлены на рис. 2 и 3.



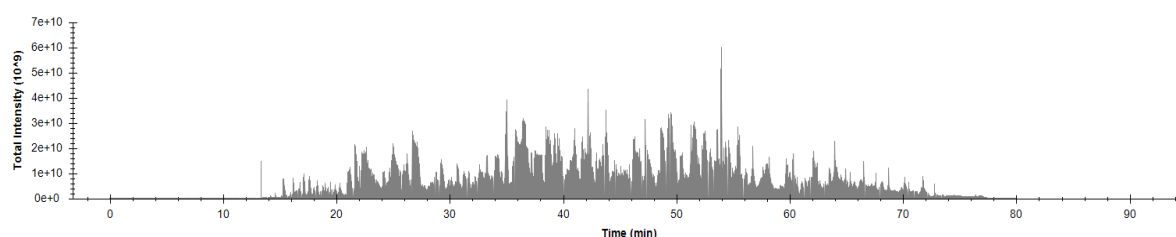
Гидролизат белка нута, полученный с использованием ФП "Alcalase 2.4 L FG"



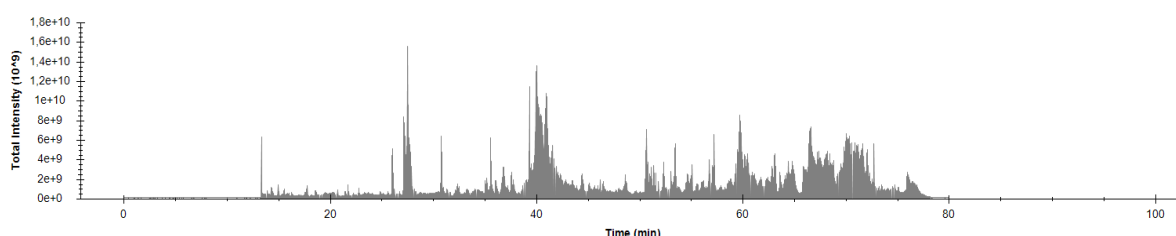
Гидролизат белка нута, полученный с использованием ФП "Neutrase 0.8 L"



Гидролизат белка нута, полученный с использованием ФП "Flavourzyme 1000 L"



Гидролизат белка нута, полученный с использованием ФП "Пепсин"

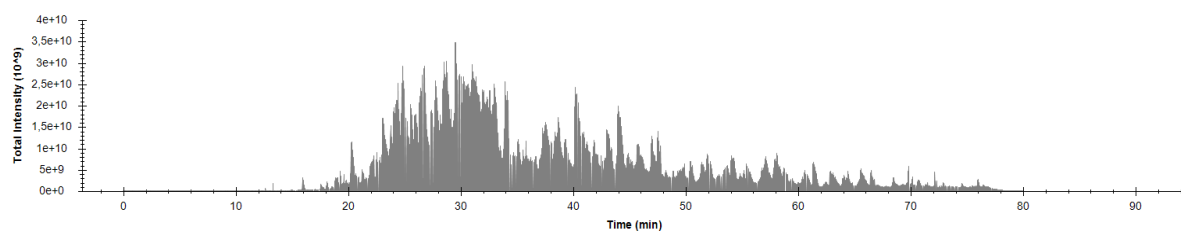


Гидролизат белка нута, полученный с использованием ФП "Трипсин"

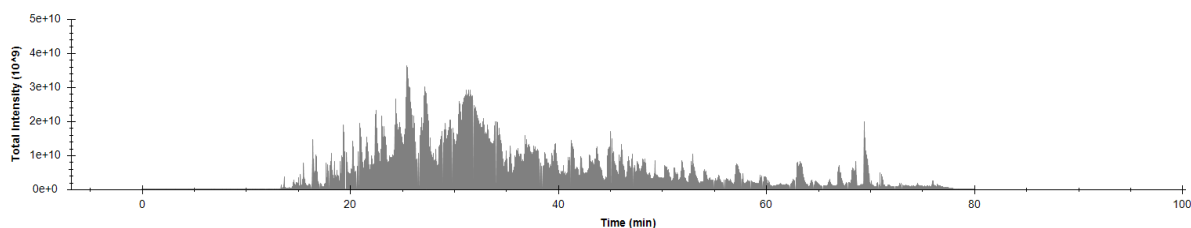
Рис. 2. Профили образцов гидролизатов белка нута, полученных с использованием ФП "Alcalase 2.4 L FG", "Neutrase 0.8 L", "Flavourzyme 1000 L", "Пепсин" и "Трипсин"
Fig. 2. Profiles of chickpea protein hydrolysate samples obtained using enzyme preparations Alcalase 2.4 L FG, Neutrase 0.8 L, Flavourzyme 1000 L, Pepsin, and Trypsin

Полученные профили характеризовались высокой плотностью сигналов, равномерно распределенных по всей оси времени, что свидетельствовало о значительном разнообразии полученных пептидов. Для каждой последовательности было рассчитано процентное соотношение ее площади к суммарной площади

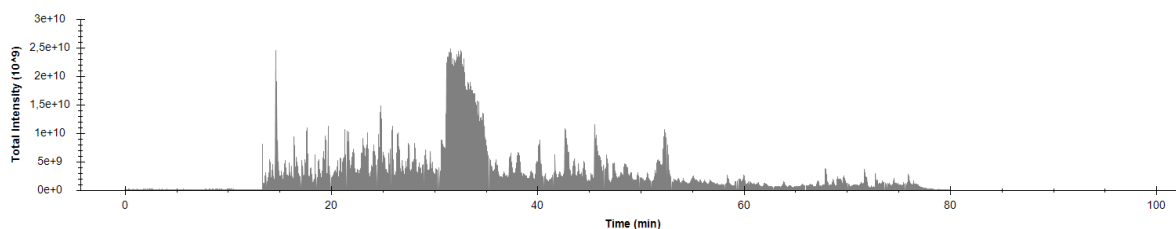
всех пептидов. К мажорным были отнесены пептиды, доля площади под пиком которых превышала условный порог в 0,5 % от общей площади всех пептидов образца.



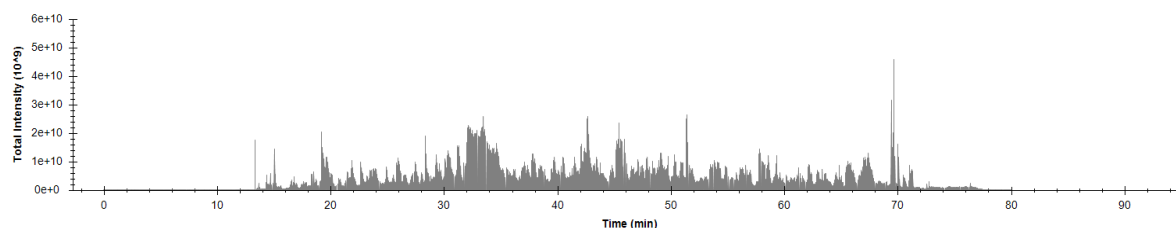
Гидролизат белка рапса, полученный с использованием ФП "Alcalase 2.4 L FG"



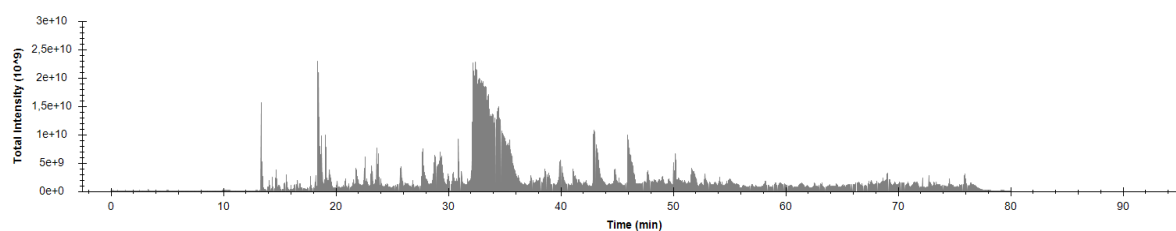
Гидролизат белка рапса, полученный с использованием ФП "Neutrase 0.8 L"



Гидролизат белка рапса, полученный с использованием ФП "Flavourzyme 1000 L"



Гидролизат белка рапса, полученный с использованием ФП "Пепсин"



Гидролизат белка рапса, полученный с использованием ФП "Трипсин"

Рис. 3. Профили образцов гидролизатов белка рапса, полученных с использованием ФП "Alcalase 2.4 L FG", "Neutrase 0.8 L", "Flavourzyme 1000 L", "Пепсин" и "Трипсин"

Fig. 3. Profiles of rapeseed protein hydrolysate samples obtained using enzyme preparations Alcalase 2.4 L FG, Neutrase 0.8 L, Flavourzyme 1000 L, Pepsin, and Trypsin

Для гидролизата белка нута отобрано 36 ("Alcalase 2.4 L FG"), 37 ("Neutrase 0.8 L"), 27 ("Flavourzyme 1000 L"), 32 ("Пепсин") и 22 ("Трипсин") пептида, а также 34, 36, 24, 40, 31 последовательности из белка рапса в том же порядке ферментов. Прогноз потенциальной биологической активности проводился с использованием баз данных, указанных в разделе Материалы и методы. Полученные данные позволяют предварительно оценить целесообразность использования того или иного ФП в зависимости от субстрата и требуемого профиля биологической активности пептидов. Следовательно, выбор ФП должен определяться

не только степенью гидролиза, но и преобладанием в полученном гидролизате пептидов с заданной активностью. Результаты исследования представлены на рис. 4.

В исследованиях *Гаравири и др. (2025)*, *Gharaviri et al. (2026)* и *Garbacz et al. (2025)* доминирующими классами биологически активных пептидов являются ингибиторы АПФ и DPP-IV. Во всех работах наблюдалось присутствие пептидов с предсказанной противоопухолевой активностью. Пептиды с антибактериальной активностью присутствовали в нашем эксперименте в незначительном количестве, при этом в ходе гидролиза рапса ФП "Alcalase 2.4 L FG" было отмечено их полное отсутствие (рис. 4). В работе *Гаравири и др. (2025)* в ходе *in silico* гидролиза антибактериальная активность была предсказана только для одного пептида рапса, полученного папаином, а *Garbacz et al. (2025)* обнаружили единичную антибактериальную последовательность лишь в гидролизате, полученном с использованием фицина. Вероятнее всего, наличие данной активности в большей степени зависит от выбранного фермента, а не от источника белка.

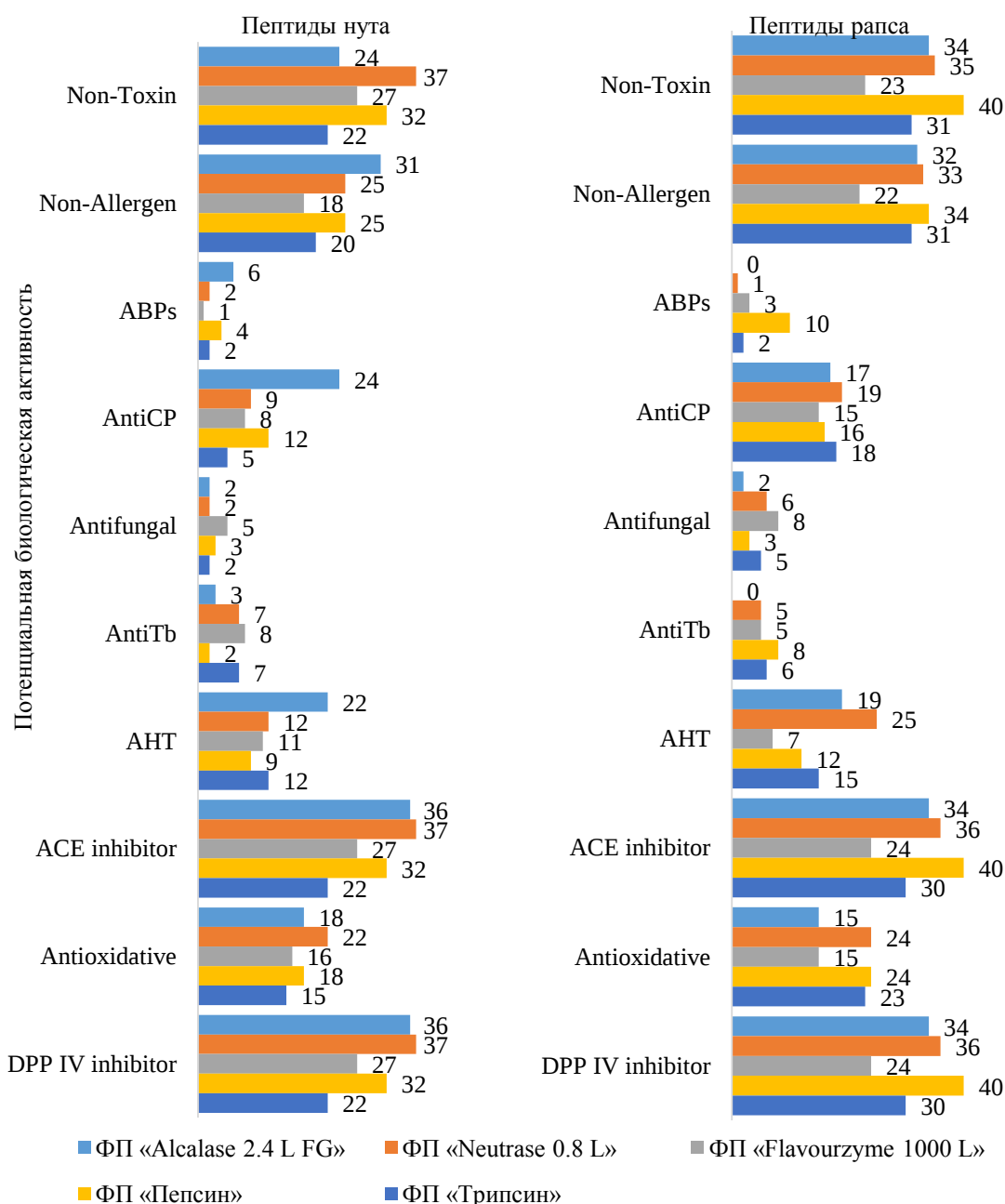


Рис. 4. Распределение пептидов белков нута и рапса, полученных с использованием ФП "Alcalase 2.4 L FG", "Neutrase 0.8 L", "Flavourzyme 1000 L", "Пепсин" и "Трипсин", в соответствии с их предсказанной биологической активностью
Fig. 4. Distribution of chickpea and rapeseed protein peptides obtained using enzyme preparations Alcalase 2.4 L FG, Neutrase 0.8 L, Flavourzyme 1000 L, Pepsin, and Trypsin according to their predicted biological activity

В результате экспериментального протеолиза, проводившегося с использованием тех же ферментов, суммарно было идентифицировано значительно больше пептидов. Это объясняется тем, что в эксперименте гидролизу подвергалась вся белковая фракция изолята, тогда как *in silico* протеолиз ограничивался референсными последовательностями запасных белков. Кроме того, ВЭЖХ-МС/МС выявляет пептиды, образующиеся при неспецифическом расщеплении, частичном протеолизе и неферментативных модификациях, что невозможно смоделировать в BIOPEP-UWM.

В программном обеспечении "ЭкспТеоПеп" было проведено сравнение пептидного профиля теоретических и экспериментальных последовательностей пептидов гидролизатов изолятов белков нута и рапса. На рис. 5 показан пример результата определения сходимости теоретических и экспериментальных данных.

1. Экспериментальная база Теоретическая база

2. Статистика загрузки

C:\Users\User\Desktop\Сравнение пептидов
Экспериментальные_данные_статья.csv:
Загружено пептидов -357
C:\Users\User\Desktop\Сравнение пептидов
Теоретические_данные_нут_папс_конопля.cs
v:
Загружено пептидов -5512

3. Параметры поиска Разрешено замен % 0 Разрешено Гэпов % 0

Фильтры для теоретической базы		Фильтры для экспериментальной базы	
Тип	Папс	Тип	Папс
Белок		Белок	
Фермент	Протеиназа К	Фермент	Alcalase 2.4 L

Сравнить пептиды

4. Результаты работы:

```

4499;61;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU4;Протеиназа K;Alcalase 2.4
L;GEGQGQGGQQGGQHQQGGQGGQGGQGGQGGQGSQGFG;GQFVGIRPLRGGQGGQPQ;20%
4499;70;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU4;Протеиназа K;Alcalase 2.4
L;GEGQGQGGQQGGQHQQGGQGGQGGQGGQGGQGSQGFG;GVIRPPLRGQGGQPQ;24%
4506;59;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin BnC1;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;ASHQNQLNQLDRNPFP;30%
4506;60;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU4;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;ASHQNQLNQLDRNPFP;30%
4507;61;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU4;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;EGREQPGQFVGIRPPLRQGGQGPQ;15%
4507;70;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU4;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;EGREQPGFVGIRPPLRQGGQGPQ;18%
4512;63;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin, Cruciferin BnC1;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;RTGDTI;HIRTGDTIATHPGVA;40%
4516;62;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU4;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;EEARRV;ARRIKFN;43%
4526;66;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU1;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;AGNNP;YWDHNNPQIR;30%
4527;55;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin, Cruciferin BnC1;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;RSQRPSVIRPPLRSQRPEE;38%
4527;57;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin, ;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;RSQRPSVIRPPLRSQRPEE;33%
4530;61;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU4;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;SQGQL;GQFVGIRPPLRQGGQGPQ;15%
4530;70;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU4;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;SQGQL;GVIRPPLRQGGQGPQ;18%
4533;63;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin, Cruciferin BnC1;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;ATHP;HIRTGDTIATHPGVA;27%
4534;59;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin, Cruciferin BnC1;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;DRNP;NQLDRNPFP;40%
4535;61;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU4;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;QGQV;GQFVGIRPPLRQGGQGPQ;15%
4535;70;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU4;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;QGQV;GVIRPPLRQGGQGPQ;18%
4538;57;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin, ;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;QEVE;SVIRPPLRSQRPEE;20%
4549;58;Panc;Panc;Cruciferin;11S globulin, Cruciferin CRU1;Протеиназа K;Alcalase 2.4 L;GRV;VYKPNIGRVIT;30%
```

Рис. 5. Пример работы программы "ЭкспТеоПеп" для сравнения образцов
Fig. 5. Example of the "ExpTeoPep" software operation for sample comparison

Средний процент сходимости составил 19,4 % для гидролизатов нута и 23,4 % для гидролизатов рапса (рис. 6). Наибольшее совпадение наблюдалось для образцов, гидролизованных ферментами "Alcalase 2.4 L FG", "Neutrase 0.8 L" и "Flavourzyme 1000 L" (рис. 7). Было выявлено 6 пептидов с процентом сходимости более 80 %, при этом сходимость одного из них составила 100 %, что указывает на высокую воспроизводимость пептидного профиля при использовании ферментов с неспецифическим действием.

Наблюдаемый процент сходимости обуславливается тем, что в ходе теоретического гидролиза выбранный фермент осуществляет полный гидролиз. В рамках экспериментальных работ степень ферментативного гидролиза составляла приблизительно 10 %. В реальных условиях, что подтверждается графиками динамики ферментативной деструкции, основной процесс осуществляется в первый час, и с увеличением длительности ферментативной обработки не наблюдается интенсивного прироста формального числа. По этой причине с технологической точки зрения не имеет смысла проводить процесс для достижения

степени гидролиза более 10 %. В практических условиях достичь степени гидролиза более 50 %, а также 100 % не представляется возможным.

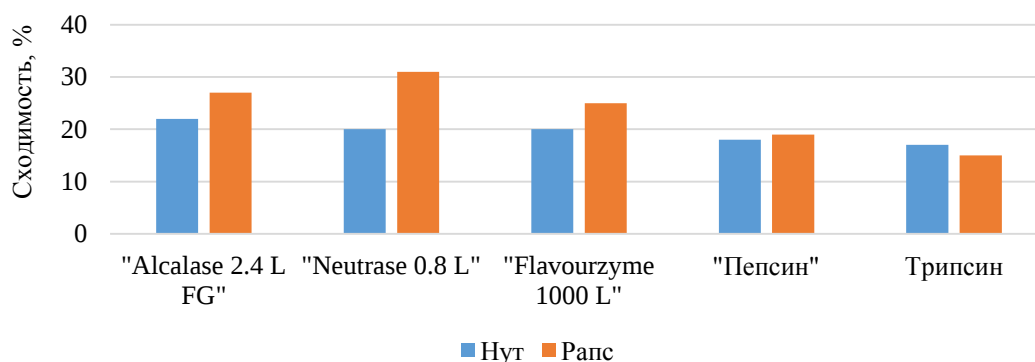


Рис. 6. Средний процент сходимости теоретических и экспериментальных данных гидролиза белков нута и рапса

Fig. 6. Average matching percentage of theoretical and experimental data from hydrolysis of chickpea and rapeseed proteins

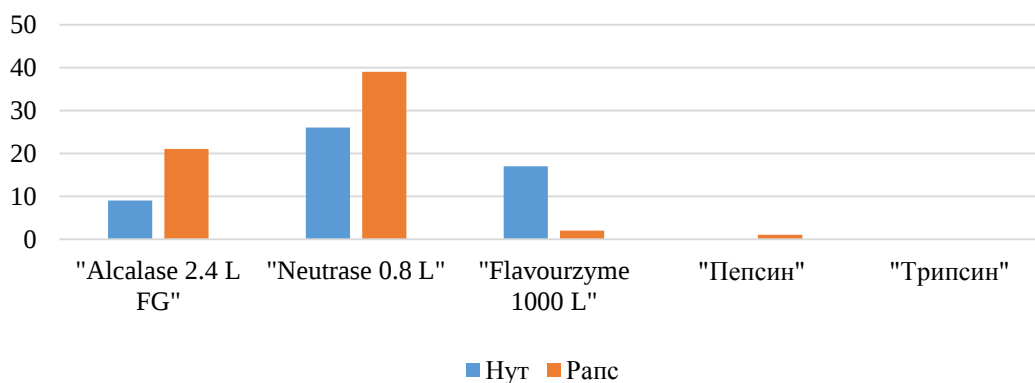


Рис. 7. Количество пептидов, процент сходимости которых равен или превышает 50 %

Fig. 7. Number of peptides with a matching percentage equal to or exceeding 50 %

Логика программы "ЭкспТеоПеп" подразумевает сравнение относительного количества аминокислот в найденном мотиве. Пептиды, полученные в ходе экспериментального гидролиза, характеризуются большей длиной последовательности, тогда как пептиды, полученные в рамках теоретического гидролиза, чаще всего значительно короче.

Для оценки воспроизводимости пептидного профиля в этой же программе были сопоставлены два независимых гидролизата белка рапса, полученных с использованием фермента "Alcalase 2.4 L FG": первый образец из настоящего исследования и второй, полученный в предыдущей работе при тех же условиях (5 % суспензия, дозировка 1,5 %, pH 8,0, 45 °C, 40 мин). В ходе этого гидролиза количество идентифицированных пептидов составило 6 667 против 8 606 последовательностей в настоящем исследовании, что примерно в 1,3 раза меньше. Сравнение проводили путем сопоставления мажорных пептидов, для этого в гидролизате из прошлой работы по аналогичному критерию отбора были определены 32 мажорные последовательности. Общий процент сходимости сравниваемых гидролизатов *in silico* составил 82 %. При этом 21 последовательность оказалась полностью идентичной.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что проведенный в ходе данного исследования гидролиз не является специфичным, высокий процент сходимости говорит о том, что основной пептидный профиль при аналогичных условиях получения является постоянным.

Заключение

В результате проведенных исследований гидролиза изолятов белка нута и рапса пятью ферментными препаратами было установлено, что максимальная степень гидролиза для обоих субстратов была достигнута при использовании "Alcalase 2.4 L FG". Наиболее интенсивная деструкция обоих изолятов происходит в первые 60 мин, после чего скорость процесса заметно снижается.

Методом ВЭЖХ-МС/МС в гидролизатах нута и рапса суммарно было идентифицировано 56 635 и 48 780 последовательностей соответственно. Суммарное число идентифицированных в ходе эксперимента последовательностей значительно превышает теоретические прогнозы, что может объясняться учетом всех изоформ, посттрансляционных модификаций и неспецифического расщепления, не моделируемых в базах данных.

Результаты биоинформатического анализа показывают высокий потенциал нута и рапса в качестве ингибиторов АПФ и DPP-IV, а также свидетельствуют о наличии противоопухолевой, антиоксидантной и антибактериальной активностей. Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами других исследований подтвердило высокую степень соответствия предсказываемой биологической активности полученных пептидов.

В программе "ЭкспТеоПеп" были сопоставлены экспериментальные данные с теоретическими *in silico* гидролизатами, а также оценена воспроизводимость пептидного состава на примере двух независимых гидролизатов рапса, полученных в идентичных условиях с использованием "Alcalase 2.4 L FG". Средний процент сходимости в первом случае составил 19,4 % для нута и 23,4 % для рапса, при этом было выявлено 6 пептидов со сходимостью более 80 %. Во втором случае сходимость составила 82 %, причем 21 последовательность из предыдущего гидролизата полностью совпала с мажорными последовательностями настоящего исследования. Полученные данные свидетельствуют о высокой воспроизводимости основного пептидного профиля. Продемонстрированная эффективность программы делает ее перспективным инструментом для сравнения и отбора последовательностей.

Дальнейшие исследования будут направлены на проведение молекулярного докинга и отбора перспективных последовательностей с заданной биологической активностью для проведения химического синтеза пептидов и подтверждения их биологической активности на клеточных системах.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-16-00178).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

- Agrawal, P., Bhagat, D., Mahalwal, M., Sharma, N. et al. 2021. AntiCP 2.0: An updated model for predicting anticancer peptides. *Briefings in Bioinformatics*, 22(3). Article number: bbaa153. DOI: <https://doi.org/10.1093/bib/bbaa153>.
- Agrawal, P., Bhalla, S., Chaudhary, K., Kumar, R. et al. 2018. *In silico* approach for prediction of antifungal peptides. *Frontiers in Microbiology*, 9. Article number: 323. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00323>.
- Akbarian, M., Khani, A., Eghbalpour, S., Uversky, V. N. 2022. Bioactive peptides: Synthesis, sources, applications, and proposed mechanisms of action. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3). Article number: 1445. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23031445>.
- Bajiya, N., Choudhury, S., Dhall, A., Raghava, G. P. S. 2024. AntiBP3: A method for predicting antibacterial peptides against gram-positive/negative/variable bacteria. *Antibiotics*, 13(2). Article number: 168. DOI: <https://doi.org/10.3390/antibiotics13020168>.
- Begum, N., Khan, Q. U., Liu, L. G., Li, W. et al. 2023. Nutritional composition, health benefits and bio-active compounds of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Frontiers in Nutrition*, 10. Article number: 1218468. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1218468>.
- Bompart, C., Walrand, S., Gueugneau, M. 2026. Nutritional quality of proteins from major oilseeds – a review. *OCL*, 33. DOI: <https://doi.org/10.1051/ocl/2025036>.
- Cruz-Casas, D. E., Aguilar, C. N., Ascacio-Valdés, J. A., Rodríguez-Herrera, R. et al. 2021. Enzymatic hydrolysis and microbial fermentation: The most favorable biotechnological methods for the release of bioactive peptides. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 3. Article number: 100047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2021.100047>.
- Degtyarev, I. A., Fomenko, I. A., Ivanova, L. A., Mizheva, A. A. et al. Russian University of Biotechnology. 2023. Method of obtaining protein isolate from rapeseed cake, Russian Federation, Pat. 2815553. = Способ получения изолята белка из жмыха рапса : пат. № 2815553 Рос. Федерация / И. А. Дегтярев, И. А. Фоменко, Л. А. Иванова, А. А. Мижева [и др.]. № 2023121367 ; заявл. 16.08.2023; опубл. 18.03.2024, Бюл. № 8. (In Russ.)
- Duan, X., Dong, Y., Zhang, M., Li, Z. et al. 2023. Identification and molecular interactions of novel ACE inhibitory peptides from rapeseed protein. *Food Chemistry*, 422. Article number: 136085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136085>.

- Fan, H., Liu, H., Zhang, Y., Zhang, S. et al. 2022. Review on plant-derived bioactive peptides: Biological activities, mechanism of action and utilizations in food development. *Journal of Future Foods*, 2(2), pp. 143–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.03.003>.
- Garbacz, K., Wawrzykowski, J., Czelej, M., Waśko, A. 2025. *In silico* proteomic profiling and bioactive peptide potential of rapeseed meal. *Foods*, 14(14). Article number: 2451. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14142451>.
- Gharaviri, M., Aleksanochkin, D. I., Ahangaran, M., Fomenko, I. A. et al. 2026. Chickpea protein hydrolysates: Production, bioactivity, functional profile, and technological properties. *Foods and Raw Materials*, 14(1), pp. 198–213. DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-1-666>.
- Gharaviri, M., Degtyarev, I. A., Aleksanochkin, D. I., Fomenko, I. A. et al. 2025. Modeling of the process of enzymatic hydrolysis of plant proteins *in silico* and prediction of the biological activity of the resulting peptides. *Food Systems*, 8(4), pp. 472–478. = Гаравири М., Дегтярев И. А., Алексаночкин Д. И., Фоменко И. А. [и др.]. Моделирование процесса ферментативного гидролиза растительных белков *in silico* и прогнозирование биологической активности образующихся пептидов // Пищевые системы. 2025. Т. 8, № 4. С. 472–478. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-472-478>. EDN: VKTDQR. (In Russ.)
- Görgüç, A., Gençdağ, E., Yılmaz, F. M. 2020. Bioactive peptides derived from plant origin by-products: Biological activities and techno-functional utilizations in food developments – A review. *Food Research International*, 136. Article number: 109504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109504>.
- Grasso, N., Lynch, N. L., Arendt, E. K., O'Mahony, J. A. 2022. Chickpea protein ingredients: A review of composition, functionality and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21, pp. 435–452. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12878>.
- Gupta, S., Kapoor, P., Chaudhary, K., Gautam, A. et al. 2013. *In silico* approach for predicting toxicity of peptides and proteins. *PLoS ONE*, 8(9). Article number: e73957. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073957>.
- Katayama, S., Corpuz, H. M., Nakamura, S. 2021. Potential of plant-derived peptides for the improvement of memory and cognitive function. *Peptides*, 142. Article number: 170571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2021.170571>.
- Kumar, R., Chaudhary, K., Chauhan, J. S., Nagpal, G. et al. 2015. An *in silico* platform for predicting, screening and designing of antihypertensive peptides. *Scientific Reports*, 5. Article number: 12512. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep12512>.
- Mashentseva, N. G., Fomenko, I. A., Afanasiev, D. A., Gharaviri, M. et al. Russian University of Biotechnology. 2023. Method of obtaining protein isolate from chickpeakes of desi or kabuli type, Russian Federation, Pat. 2803851. = Способ получения белкового изолята из бобов нута типа Дези или Кабули : пат. № 2803851 Рос. Федерация / Н. Г. Машенцева, И. А. Фоменко, Д. А. Афанасьев, М. Гаравири [и др.]. № 2023119096 ; заявл. 19.07.2023; опубл. 21.09.2023, Бюл № 27. (In Russ.)
- Minkiewicz, P., Iwaniak, A., Darewicz, M. 2019. BIOPEP-UWM database of bioactive peptides: Current opportunities. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(23). Article number: 5978. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20235978>.
- Mooney, C., Haslam, N. J., Pollastri, G., Shields, D. C. 2012. Towards the improved discovery and design of functional peptides: Common features of diverse classes permit generalized prediction of bioactivity. *PLoS ONE*, 7(10). Article number: e45012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045012>.
- Purohit, K., Reddy, N., Sunna, A. 2024. Exploring the potential of bioactive peptides: From natural sources to therapeutics. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(3). Article number: 1391. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25031391>.
- Sharma, N., Patiyal, S., Dhall, A., Pande, A. et al. 2021. AlgPred 2.0: An improved method for predicting allergenic proteins and mapping of IgE epitopes. *Briefings in Bioinformatics*, 22(4). Article number: bbba294. DOI: <https://doi.org/10.1093/bib/bbaa294>.
- Usmani, S. S., Bhalla, S., Raghava, G. P. S. 2018. Prediction of antitubercular peptides from sequence information using ensemble classifier and hybrid features. *Frontiers in Pharmacology*, 9. Article number: 954. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00954>.
- Villaró-Cos, S., Lafarga, T. 2023. Online tools to support teaching and training activities in chemical engineering: Enzymatic proteolysis. *Frontiers in Education*, 8. Article number: 1290287. DOI: <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1290287>.
- Yang, F., Huang, J., He, H., Ju, X. et al. 2023. Study on the hypolipidemic activity of rapeseed protein-derived peptides. *Food Chemistry*, 423. Article number: 136315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136315>.

Сведения об авторах

Мижева Айслу Альбертовна – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), аспирант;
e-mail: mizheva.aislu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0847-0819>

Aislu A. Mizheva – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
State University ROSBIOTECH, PhD Student;
e-mail: mizheva.aislu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0847-0819>

Фоменко Иван Андреевич – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), канд. техн. наук, доцент;
e-mail: iv.fomenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2478-1705>

Ivan A. Fomenko – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
State University ROSBIOTECH, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: iv.fomenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2478-1705>

Чернуха Ирина Михайловна – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), д-р техн. наук, профессор, академик РАН;
e-mail: imcher@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4298-0927>

Irina M. Chernukha – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
State University ROSBIOTECH, Dr Sci. (Engineering), Professor,
Member of the Russian Academy of Sciences;
e-mail: imcher@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4298-0927>

Подобуев Федор Васильевич – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), бакалавр;
e-mail: fedorpod@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9551-2824>

Fedor V. Podobuev – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
State University ROSBIOTECH, Bachelor;
e-mail: fedorpod@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9551-2824>

Синтез и характеристики карбоксиметилированных производных хитина из панцирей камчатского краба и краба-стригуна

В. Ю. Новиков, Н. В. Долгопятова, И. Н. Коновалова,
Ю. А. Кучина, А. Ю. Глухарев, С. Р. Деркач*

*Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия;
e-mail: derkachsr@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5871-9320>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
21.05.2026;

принята
к публикации
17.06.2026

Ключевые слова:

хитин,
карбоксиметилхитин,
карбоксиметилирование,
панцирь краба,
камчатский краб,
краб-стригун

Хитин – второй по распространенности природный полимер после целлюлозы, являющийся основным компонентом экзоскелетов морских ракообразных (крабов, омаров, креветок). Хитозан и карбоксиметилированные производные хитина нетоксичны, обладают биосовместимостью, биологической активностью, проявляют антибактериальные, иммуностимулирующие, противоопухолевые, ранозаживляющие и другие свойства. Уникальные свойства этого биополимера и его производных обуславливают широкое применение в пищевой промышленности, медицине, фармацевтике, косметологии, сельском хозяйстве, химии и катализе, биотехнологии и аквакультуре. Цель исследования – разработка способа получения производного хитина – карбоксиметилхитина с хорошей растворимостью в воде. В качестве сырья использован хитозан, полученный из панцирей камчатского краба и краба-стригуна опилию, выловленных в Баренцевом море. Установлены необходимые технологические условия ацетилирования хитозана и последующего карбоксиметилирования хитина. Исследования полученного карбоксиметилхитина методом кондуктометрического титрования показали, что содержание карбоксиметильных групп составило 38 %. Растворимость карбоксиметилхитина, полученного по разработанному методу, возрастает с увеличением pH и при pH 8,0 составляет около 82 % от массы полимера. Изучение данных рентгенофазного анализа показало, что степень кристалличности исходного хитозана, ацетилированных и карбоксиметилированных образцов отличается незначительно и составляет 52–57 %. Карбоксиметилхитин, полученный из панциря краба-стригуна, характеризуется широким молекулярно-массовым распределением по данным метода высокоэффективной жидкостной хроматографии. Обнаружено наличие 6 основных фракций с молекулярными массами от 0,05 до 656 kDa, наибольший вклад (67 %) из которых вносит фракция с невысокой молекулярной массой (35 kDa). Проведенное исследование может быть полезно для предприятий, занимающихся промышленной добычей и комплексной переработкой крабов для решения задач безотходного использования сырья и получения дополнительных коммерчески востребованных продуктов.

Для цитирования

Новиков В. Ю. и др. Синтез и характеристики карбоксиметилированных производных хитина из панцирей камчатского краба и краба-стригуна. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 347–360. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-347-360>.

Synthesis and characteristics of carboxymethylated chitin derivatives from the shells of king crab and snow crab

Vitaly Yu. Novikov, Natalia V. Dolgopyatova, Irina N. Konovalova,
Yulia A. Kuchina, Andrei Yu. Glukharev, Svetlana R. Derkach*

Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia;

e-mail: derkachsr@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5871-9320>

Article info

Received
21.05.2026;

accepted
17.06.2026

Key words:

chitin,
carboxymethyl chitin,
carboxymethylation,
crab shell,
king crab,
snow crab

Abstract

Chitin is the second most common natural polymer after cellulose being the main component of the exoskeletons of marine crustaceans, such as crabs, lobsters, and shrimp. Chitosan and carboxymethylated chitin derivatives are non-toxic, have biocompatibility, biological activity, and exhibit antibacterial, immunostimulating, antitumor, wound-healing and other properties. The unique properties of this biopolymer and its derivatives determine their wide use in the food industry, medicine, pharmaceuticals, cosmetology, agriculture, chemistry and catalysis, biotechnology and aquaculture. The goal of our research is to develop a method for producing a chitin derivative, carboxymethyl chitin, with good solubility in water. The raw material used is chitosan obtained from the shells of king crab and opilio snow crab caught in the Barents Sea. The necessary technological conditions for the acetylation of chitosan and subsequent carboxymethylation of chitin have been established. Studies of the resulting carboxymethyl chitin by conductometric titration have shown that the content of carboxymethyl groups is 38 %. The solubility of carboxymethyl chitin obtained by the developed method increases with increasing pH and at pH 8.0 it is about 82 % by weight of the polymer. Studies of X-ray phase analysis data show that the degree of crystallinity of the original chitosan, acetylated and carboxymethylated samples differs slightly and amounts to 52–57 %. Carboxymethyl chitin, obtained from the snow crab shell, is characterized by a wide molecular weight distribution according to high-performance liquid chromatography. The presence of six main fractions with molecular weights from 0.05 to 656 kDa is discovered, the largest contribution (67 %) of which is made by a fraction with a low molecular weight (35 kDa). The conducted research may be useful for enterprises involved in the industrial extraction and complex processing of crabs to solve problems of non-waste use of raw materials and obtain additional commercially in demand products.

For citation

Novikov, V. Yu. et al. 2026. Synthesis and characteristics of carboxymethylated chitin derivatives from the shells of king crab and snow crab. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 347–360. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-347-360>.

Введение

Природные полисахариды представляют собой высокомолекулярные соединения, построенные из элементарных звеньев моносахаридов, соединенных между собой гликозидными связями (*Mohammed et al.*, 2021; *Zhang et al.*, 2022). Значительный интерес к полимерам природного происхождения – хитину и хитозану – объясняется уникальным комплексом физико-химических свойств этих полисахаридов и широким спектром их биологической активности (*Wang et al.*, 2020). Хитин и его водорастворимые производные широко используются в медицине и фармацевтике, пищевой промышленности, сельском хозяйстве, природоохранных технологиях, парфюмерно-косметической промышленности, биотехнологиях и других областях (*Younes et al.*, 2015; *Patel et al.*, 2026). В России источником хитинсодержащего сырья являются промысловые крабы на Дальнем Востоке, северная креветка и акклиматизированный в Баренцевом море камчатский краб. Основным промышленным методом получения хитина и хитозана является химический способ переработки панциря ракообразных (*Новиков и др.* 2018; *Santos et al.*, 2020).

Химический гидролиз хитина и хитозана как кислотный, так и щелочной, заключается в расщеплении ацетамидных и гликозидных связей, что приводит к процессам деацетилирования, связанным с расщеплением ацетамидных связей, и деструкции, выраженной расщеплением гликозидных связей (*Хитин и хитозан...*, 2002; *Novikov et al.*, 2023). Процесс получения хитозана из хитинсодержащего сырья состоит из двух этапов: выделение хитина и его последующее щелочное деацетилирование. Значительным преимуществом хитозана является его растворимость в воде (в кислых водных средах) в отличие от хитина (*Schröder et al.*, 2025). Растворимость хитозана растёт с увеличением его степени деацетилирования.

Химическая модификация природных полисахаридов хитина и хитозана с получением водорастворимых соединений расширяет области их практического использования. Особое место среди водорастворимых производных хитина и хитозана занимают его карбоксиметилированные производные (*Пестов и др.*, 2007; *Mourya et al.*, 2010; *Боймирзаев*, 2024). Карбоксиметилированные производные сохраняют все уникальные свойства хитина и хитозана, например, такие как биосовместимость и биоразлагаемость, антимикробная активность, пленкообразующая способность и способность к гелеобразованию, хелатирующая способность и др. При этом они обладают рядом преимуществ, а именно: высокой растворимостью в воде (включая нейтральные и щелочные водные среды), амфотерными свойствами, способностью проявлять полиэлектролитные свойства в водных растворах (*Islam et al.*, 2023).

Цель работы – получение хорошо растворимых в воде карбоксиметилированных производных хитина (карбоксиметилхитина) из хитозана, выделенного из хитинсодержащего сырья Баренцева моря – панцирей камчатского краба и краба-стригуна опилио. Особое внимание уделено изучению растворимости и структурных свойств карбоксиметилированных производных хитина.

Материалы и методы

Сырьем для получения карбоксиметилированных производных служил хитозан, полученный из панциря камчатского краба (*Paralithodes camtschaticus*) и краба-стригуна опилио (*Chionoecetes opilio*) с использованием известной технологии (*Новиков и др.*, 2012). Степень деацетилирования хитозана 72–83 %, средняя молекулярная масса 124 кДа.

Карбоксиметилхитин получали в две стадии. На первой стадии мы проводили ацетилирование хитозана (получение хитина) под действием ангидрида уксусной кислоты, варьируя концентрацию уксусного ангидрида в диапазоне от 10 до 30 % и время взаимодействия – от 1 до 24 часов. Схема реакции ацетилирования приведена на рис. 1, а. На второй стадии мы карбоксиметилировали ацетилированный хитозан (хитин) действием монохлоруксусной кислоты в щелочной среде. Время взаимодействия варьировали в диапазоне от 3 до 7 суток. Схема реакции приведена на рис. 1, б.

Степень деацетилирования определяли методом ИК-спектроскопии с использованием ИК-спектрометра Shimadzu IRTTracer-100 (Япония) в диапазоне частот от 2 000 до 700 см⁻¹. Определение содержания карбоксиметильных групп в карбоксиметилхитине (в % от массы образца) проводили методом кондуктометрического титрования (*Новиков и др.*, 2012) с использованием кондуктометра АНИОН 4100 (Россия). Молекулярную массу и молекулярно-массовое распределение определяли методом эксклюзионной высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), определения проводили на хроматографе LC-10A_{VP} Shimadzu (Япония). Выходящие с колонок хроматографа фракции регистрировали по оптическому поглощению продуктов гидролиза с использованием диодной матрицы SPD-M10A_{VP} и ультрафиолетового спектрофотометрического детектора SPD-10A_{VP} при длине волны 205 и 210 нм. Для математической обработки данных использовали программу MagicPlot 3.0.1 (Magicplot Systems, LLC, Россия).

Растворимость синтезированного карбоксиметилхитина определяли при разных pH, вычисляя разность между массой взятого на анализ полимера и массой нерастворимого остатка. Рентгенофазовый анализ

исследуемых образцов полимера был выполнен на дифрактометре Shimadzu LabX XRD-6000 (Япония). Эксперимент проводили с использованием рентгеновской трубки Cu-K α , графитового монохроматора с длиной волны монохроматического рентгеновского излучения $\lambda = 1,54178 \text{ \AA}$. Степень кристалличности определяли по методике, приведенной в работе (Новиков и др., 2012).

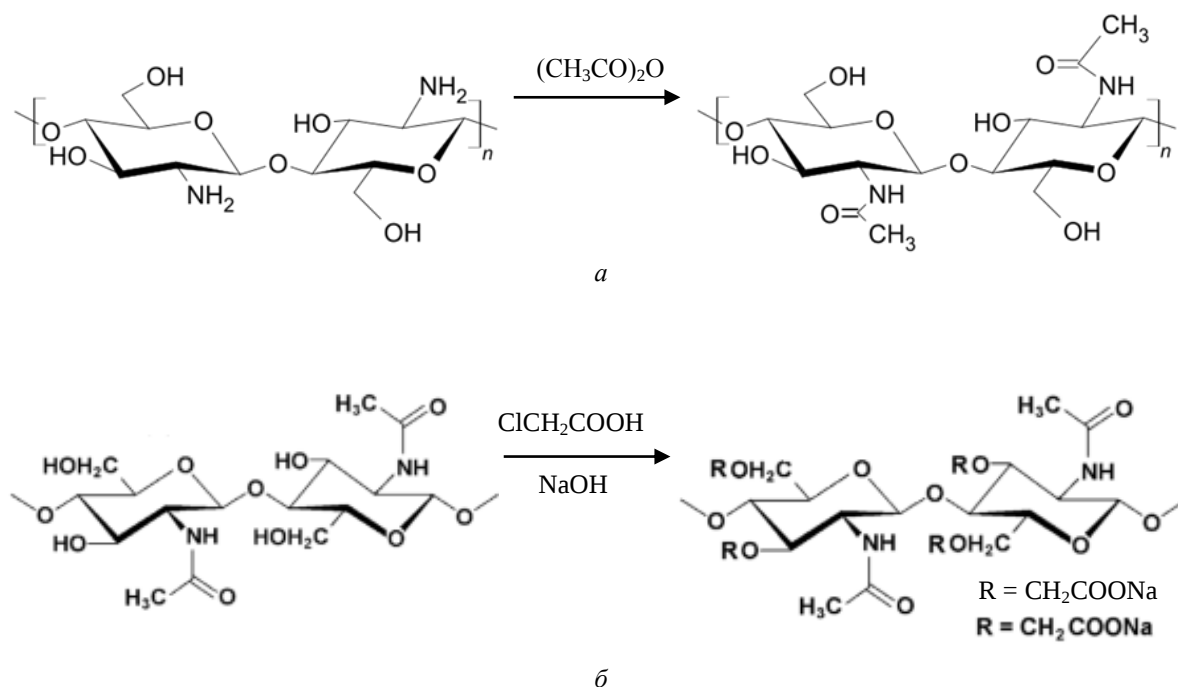


Рис. 1. Схемы реакций: *a* – ацетилирование хитозана с получением хитина;
б – карбоксиметилирование хитина с получением карбоксиметилхитина
 Fig. 1. Reaction schemes: *a* – acetylation of chitosan to produce chitin;
б – carboxymethylation of chitin to produce carboxymethyl chitin

Соляная кислота (37 %), гидроксид натрия (98 %), ангидрид уксусной кислоты, уксусная кислота (99,7 %), ацетон (99,5 %), этанол (99,8 %), изопропанол (99,5 %) и монохлоруксусная кислота ($\geq 99\%$) были закуплены у компании Merck (Германия). Используемые реагенты были аналитического класса и использовались без дополнительной очистки.

Результаты и обсуждение

При получении карбоксиметилхитина мы преследовали в первую очередь следующую цель – получение водорастворимого производного хитина, пригодного для определения молекулярной массы полимера методом жидкостной хроматографии. Макромолекулы хитина и хитозана могут иметь разную степень деацетилирования, что сказывается на молекулярной массе полисахарида даже при одинаковой степени полимеризации. Поэтому в работе было проведено ацетилирование хитозана с целью приведения молекулярной массы мономерного звена биополимера к одному значению. В результате подобной операции из полисахаридов (сополимеров D-глюкозамина и N-ацетилглюкозамина) с разной степенью деацетилирования получается полимер хитин (N-ацетилглюкозамин), отличающийся только степенью полимеризации. Затем мы получали из полностью ацетилированного хитина карбоксиметилхитин, характеризующийся высокой растворимостью в водных средах. Такой линейный полимер можно использовать для определения его молекулярной массы, например, методом эксклюзионной жидкостной хроматографии.

В данной работе были определены условия процесса ацетилирования хитозана для достижения минимальной степени деацетилирования. На рис. 2 в качестве примера представлены ИК-спектры ацетилированных образцов, полученных при разном времени протекания реакции ацетилирования и концентрации ангидрида уксусной кислоты, равной 20 %. ИК-спектры были смещены относительно друг друга для наилучшего восприятия рисунка.

Результаты экспериментов показали, что полностью ацетилированных образцов хитина со степенью деацетилирования, приближающейся к 0 %, получить не удалось. Степень деацетилирования образцов

варьируется в диапазоне 11,6–18,0 %, что несколько меньше, чем для природного хитина. Показано, что степень деацетилирования полученных образцов хитина не зависит от концентрации ацетилирующего агента (ангидрида уксусной кислоты). Варьирование времени реакции в интервале от 10 до 120 мин показало, что основное уменьшение степени деацетилирования происходит в первые 15 мин реакции. На основании проведенных экспериментов были выбраны условия проведения ацетилирования хитозана, а именно: концентрация уксусного ангидрида 20 % и время ацетилирования 15 мин. При этом степень деацетилирования хитозана, полученного из панциря камчатского краба, варьируется в диапазоне от 12 до 16 %, а хитозана из панциря краба-стригуна составляет от 3 до 10 %.

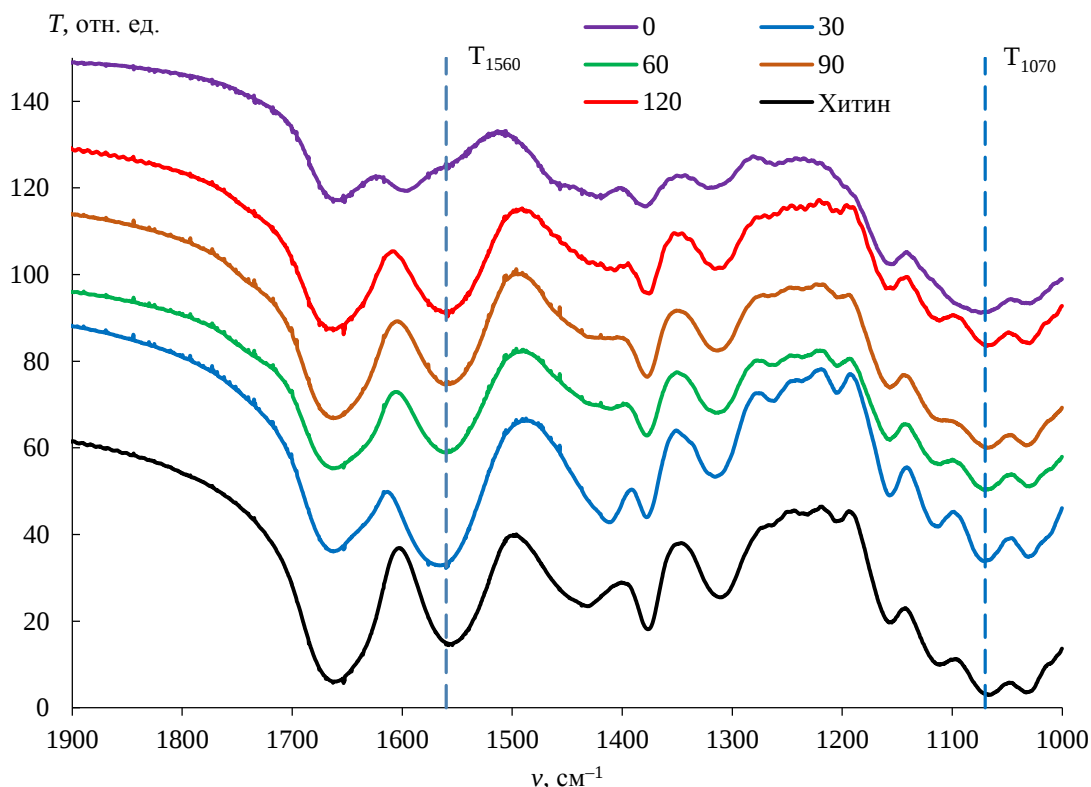


Рис. 2. ИК-спектры ацетилированных образцов хитозана. Время (мин) реакции ацетилирования указано на графике; концентрация ангидрида уксусной кислоты 20 %; исходная степень деацетилирования хитозана 83 %, использован хитозан из панциря камчатского краба
Fig. 2. IR spectra of acetylated chitosan samples. The acetylation reaction time (min) is indicated on the graph; acetic anhydride concentration is 20 %; the initial degree of deacetylation of chitosan is 83 %, chitosan from the shell of the king crab is used

Недостижимость снижения степени деацетилирования до нуля, по-видимому, связана со структурными особенностями хитозана. Известно, что хитозан имеет высокоупорядоченную структуру, образованную макромолекулами в конформации спирали. Жесткость и стабильность структуры хитозана поддерживается водородными связями гидроксильных аминогрупп, атомом кислорода пиранозного кольца и гликозидными связями (Wang *et al.*, 2020). Возможно, в силу таких конформационных особенностей некоторые группы хитозана закрыты для реакции ацетилирования.

Далее были определены условия процесса карбоксиметилирования хитина (ацетилированного хитозана) (рис. 1, б) при варьировании времени протекания реакции (Кличева и др., 2016). Показано, что содержание карбоксиметильных групп в полимере зависит от времени карбоксиметилирования (рис. 3). Наиболее подходящее время продолжительности процесса – 7 суток, в течение которого содержание карбоксиметильных групп достигает 38 %.

Образцы карбоксиметилхитина, полученные в условиях карбоксиметилирования хитина в течение 7 суток, обладали высокой растворимостью в водных средах, которая тем не менее зависит от pH среды, что хорошо согласуется с опубликованными в литературе данными (Chen *et al.*, 2004; Gao *et al.*, 2019). Растворимость карбоксиметилхитина увеличивается при переходе из кислой среды в щелочную (табл. 1).

При pH 8 она составляет около 82 %, что обусловлено полной ионизацией карбоксильных групп (Muzzarelli et al., 1982; Chen et al., 2003a) и усилением гидратации макромолекул.

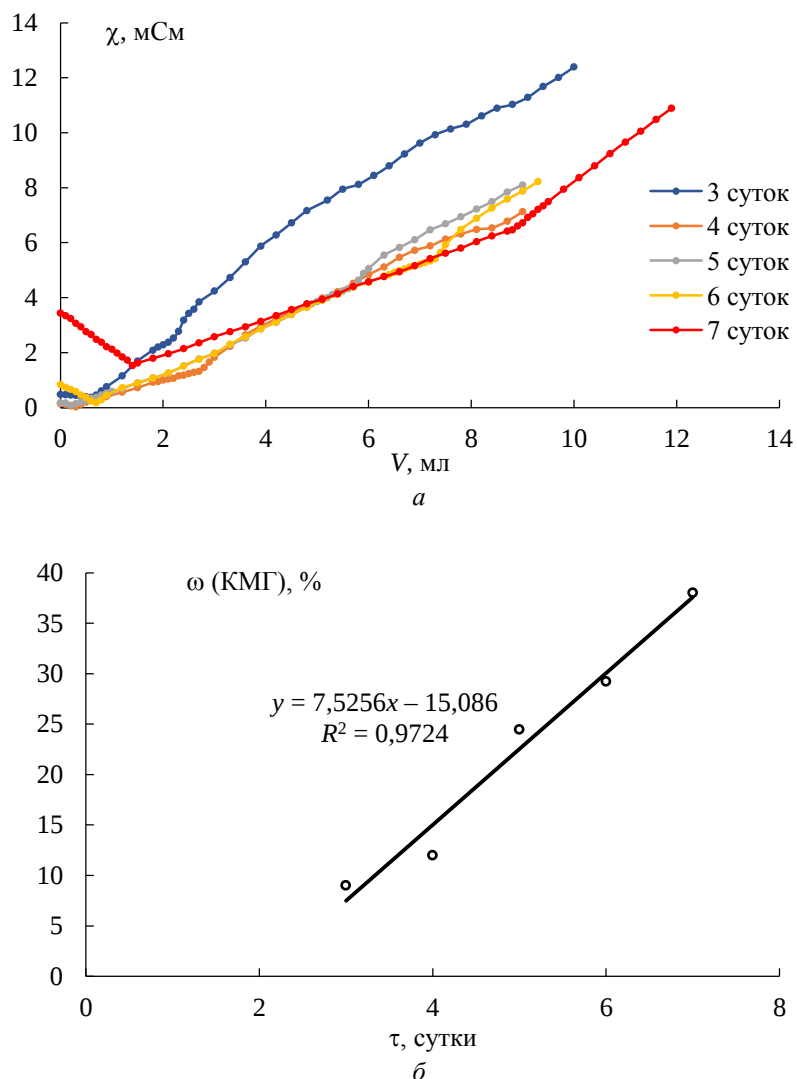


Рис. 3: *a* – кривые кондуктометрического титрования для образцов хитина, время карбоксиметилирования указано на графике; *б* – зависимость содержания карбоксиметильных групп (КМГ) от времени карбоксиметилирования. Использован ацетилированный хитозан (хитин) из панциря камчатского краба

Fig. 3: *a* – conductometric titration curves for chitin samples, the time of carboxymethylation is indicated on the graph; *б* – dependence of the content of carboxymethyl groups (CMG) on the time of carboxymethylation. Acetylated chitosan (chitin) from the shell of the king crab is used

Таблица 1. Растворимость карбоксиметилхитина, полученного в условиях карбоксиметилирования хитина в течение 7 суток, при разных значениях pH

Table 1. Solubility of carboxymethyl chitin obtained under conditions of carboxymethylation of chitin for 7 days at different pH values

pH	5,0	7,0	8,0
Растворимость, %	$75,5 \pm 0,2$	$80,0 \pm 0,2$	$81,5 \pm 0,3$

Все дальнейшие эксперименты были проведены с карбоксиметилхитином, полученным путем реакции карбоксиметилирования в течение 7 суток.

Одной из важнейших характеристик биополимера является молекулярно-массовое распределение, во многом определяющее его функциональные свойства. В нашей работе для определения молекулярно-массового распределения карбоксиметилхитина был использован метод высокоэффективной жидкостной хроматографии. На рис. 4, *a* представлена хроматограмма синтезированного образца карбоксиметилхитина.

Основной пик, наблюдаемый на хроматограмме, соответствует карбоксиметилированным фрагментам биополимера.

Для анализа сложного хроматографического профиля, представленного на рис. 4, *а*, была применена математическая обработка данных в программе MagicPlot 3.0.1. Исходный сигнал подвергался разложению на гауссианы (рис. 4, *б*, кривые 1–7), форма полосы определялась с помощью функции Гаусса, которая описывается уравнением

$$y(E) = A \cdot e^{-\frac{2,77(E-z)^2}{w^2}},$$

где A – амплитуда пика, z – положение максимума, w – полуширина на полувысоте.

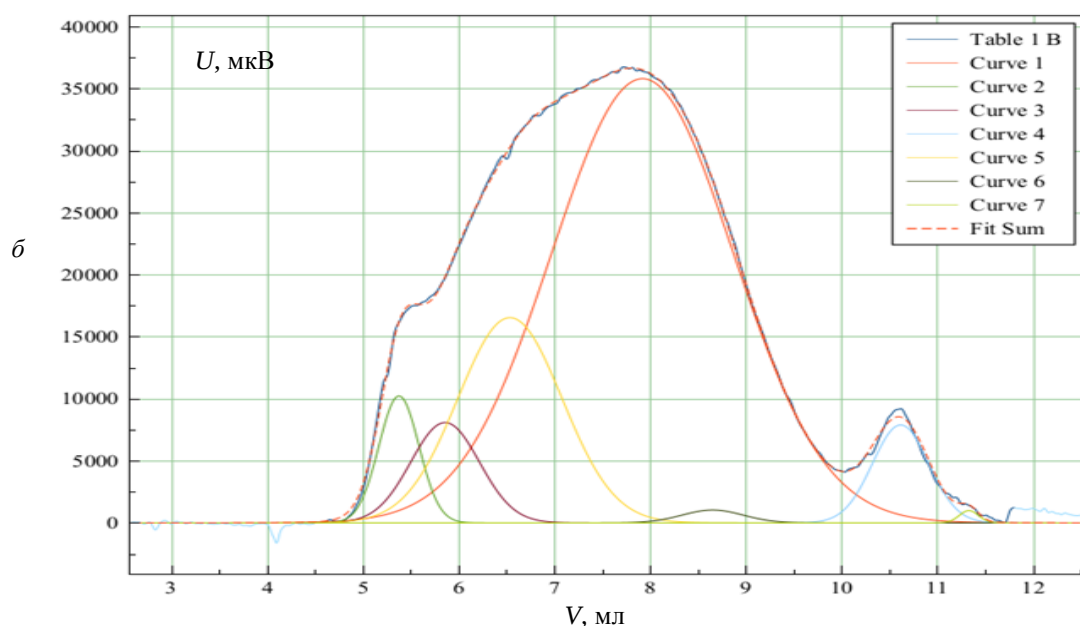
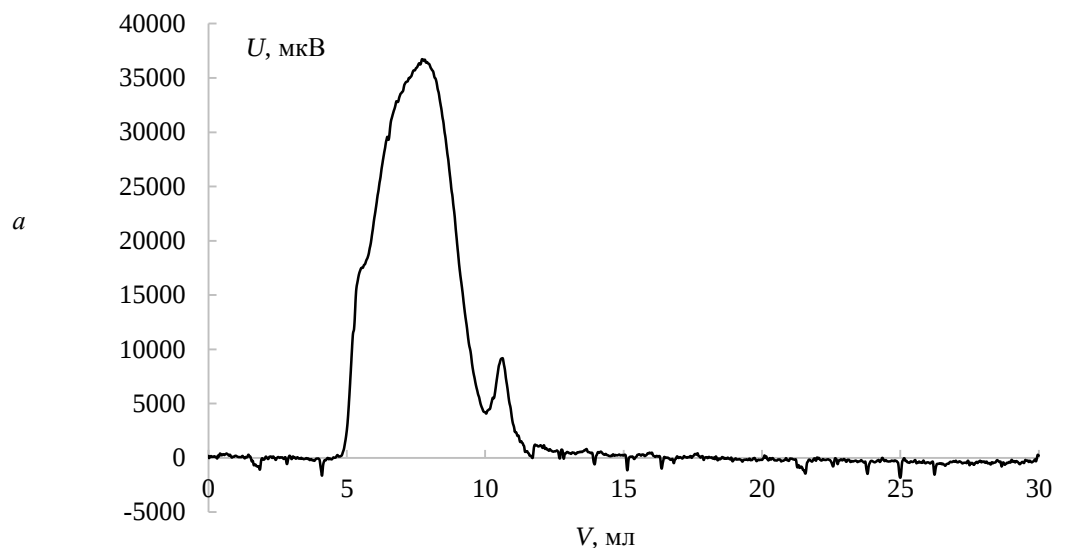


Рис. 4: *а* – хроматограмма карбоксиметилхитина; *б* – пример разложения на гауссианы спектра карбоксиметилхитина. Хитин получен из панциря краба-стригуна

Fig. 4: *a* – chromatogram of carboxymethyl chitin; *b* – example of decomposition into Gaussians of the spectrum of carboxymethyl chitin. Chitin is obtained from the shell of the opilio snow crab

Полученные компоненты соответствуют различным химическим формам карбоксиметилхитина, включая монокарбоксиметилированные фрагменты, дикарбоксиметилированные производные, а также возможные примеси. Суммарная кривая Fit Sum, представляющая собой суперпозицию всех гауссовых компонент, практически полностью воспроизводит исходный хроматографический профиль, что дополнительно подтверждает корректность проведенного анализа.

Современные исследования в области анализа модифицированных полисахаридов подтверждают, в частности, что комбинация ВЭЖХ с методами математического моделирования позволяет не только точно определять степень замещения, но и выявлять тонкие структурные особенности модифицированных полимеров (*Chen et al., 2003б; Радевич и др., 2014*). Такой комплексный подход обеспечивает получение репрезентативных данных о молекулярно-массовых характеристиках и гетерогенности образцов.

Полученные данные позволили провести анализ молекулярно-массового распределения карбоксиметилхитина (табл. 2). Исследованный образец демонстрирует выраженную полидисперсность, что характерно для продуктов химической модификации природных полимеров.

Таблица 2. Молекулярно-массовое распределение карбоксиметилхитина

Table 2. Molecular mass distribution of carboxymethyl chitin

№ фракции (№ кривой, рис. 4, б)	ММ фракции, kDa	Массовая доля фракции, %
2	656,40 ± 0,70	4,22 ± 0,31
3	255,45 ± 0,50	5,70 ± 0,11
5	120,55 ± 0,52	17,72 ± 0,20
1	34,59 ± 0,61	66,96 ± 0,25
6	14,93 ± 0,49	0,65 ± 0,09
4	0,58 ± 0,09	4,57 ± 0,12
7	0,05 ± 0,03	0,19 ± 0,08
Σ		100,00

Анализ хроматографических данных (табл. 2) выявил наличие семи основных фракций с молекулярными массами, варьирующимися в широком диапазоне от 0,05 до 656,40 kDa. Наибольший вклад в общий состав (66,96 %) вносит фракция с молекулярной массой 34,59 kDa. Особый интерес представляет обнаружение высокомолекулярной фракции (656,40 kDa), содержание которой составляет 4,22 %, что убедительно доказывает образование карбоксиметильных производных с высокой степенью полимеризации и свидетельствует о возможности образования разветвленных структур или ассоциатов макромолекул в процессе карбоксиметилирования.

Одновременно в образце присутствуют и низкомолекулярные компоненты (менее 15 kDa), суммарное содержание которых не превышает 5,4 %, что может быть связано с наличием олигомерных форм или промежуточных продуктов реакции. Например, пик с ММ 0,58 кДа может соответствовать карбоксиметильному эфиру димера хитина. Современные исследования в области химии модифицированных полисахаридов (*Jung et al., 2013*) подтверждают, что подобное распределение молекулярных масс является типичным для карбоксиметилхитина и отражает особенности процесса его получения.

Обнаруженное преобладание фракции с молекулярной массой около 35 kDa (66,96 %) полностью соответствует литературным данным (*Lei et al., 2022*), согласно которым основная часть модифицированного полимера обычно имеет молекулярную массу в диапазоне 20–50 kDa.

Полученные результаты имеют важное значение для понимания взаимосвязи между условиями проведения модификации хитина и молекулярно-массовыми характеристиками конечного продукта, что особенно актуально при разработке материалов с заданными свойствами для биомедицинского применения.

Структурные свойства твердого биополимера во многом определяют его функциональные свойства. Определение наличия кристаллических и аморфных областей в структуре хитина и его карбоксиметилированных производных является актуальной задачей, поскольку наличие таких областей часто рассматривается в качестве объяснений кинетических закономерностей реакций, например, деацетилирования хитина (*Kurita et al., 1977*). В более поздних работах показано, что выяснение влияния структурных особенностей хитина и его производных на кинетику химических реакций требует дополнительных исследований (*Novikov et al., 2023*).

В нашей работе мы определяли кристалличность хитозана и его карбоксиметильных производных методом рентгенофазового анализа. Полученные дифрактограммы для хитозана, ацетилированного хитозана (хитина) и карбоксиметилхитина (рис. 5) имеют вид, характерный для образцов, содержащих кроме кристаллической и аморфную фазу. Они содержат пики, имеющие в основании широкую линию (галло) с угловой шириной $2\theta = 10\text{--}20^\circ$ (*Вихорева и др., 2001*).

На рис. 5, а в качестве примера приведена дифрактограмма исходного хитозана со степенью деацетилирования 83 %. На рис. 5, б представлена дифрактограмма ацетилированного образца хитозана со степенью деацетилирования 10,4 %, а на рис. 5, в – дифрактограмма карбоксиметилхитина. Был проведен качественный рентгенофазовый анализ, состоящий из идентификации кристаллических фаз на основе

присущих им значений межплоскостных расстояний, d , и соответствующих интенсивностей линий, I , рентгеновского спектра. Результаты обработки дифрактограмм приведены в табл. 3.

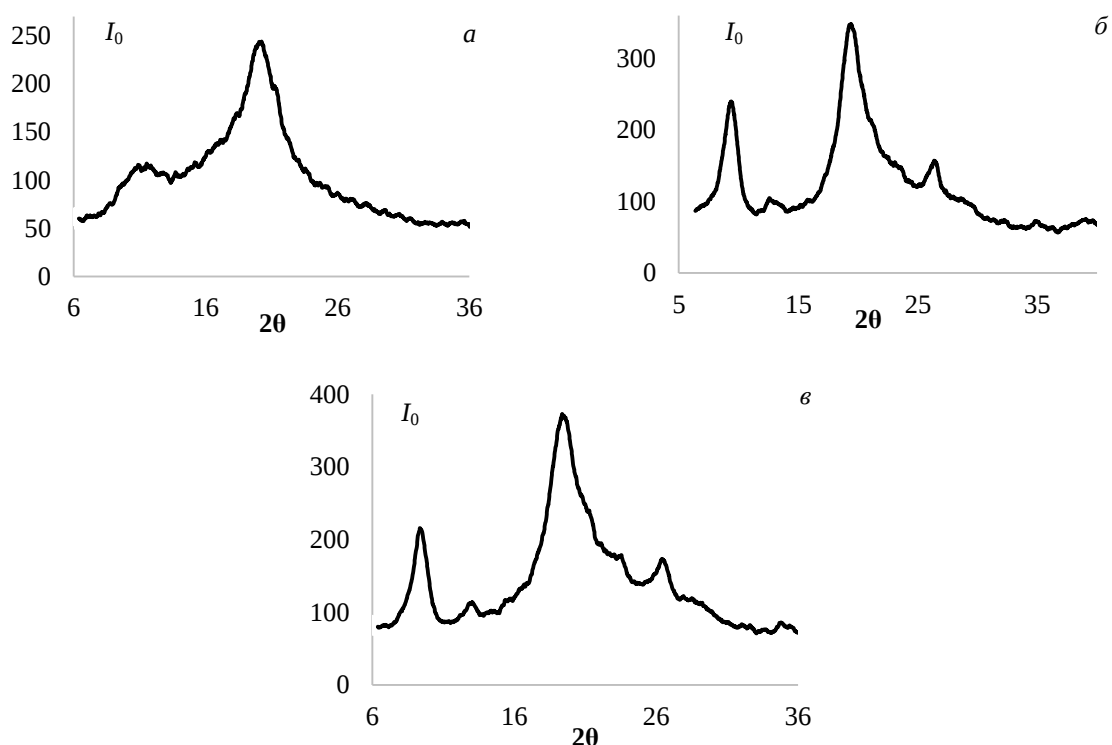


Рис. 5. Дифрактограммы: *а* – исходного хитозана, полученного из панциря камчатского краба, степень деацетилирования 83 %; *б* – ацетилированного хитозана (хитина); *в* – карбоксиметилхитина
Fig. 5. X-ray diffraction patterns: *a* – initial chitosan obtained from the shell of the Kamchatka crab, degree of deacetylation 83 %; *б* – acetylated chitosan (chitin); *в* – carboxymethyl chitin

Таблица 3. Результаты обработки дифрактограмм образцов исходного хитозана, ацелилированного хитозана и карбоксиметилхитина
Table 3. Results of processing diffraction patterns of samples of original chitosan, acelylated chitosan and carboxymethyl chitin

№ образца	Образец	$2\Theta_1$, град	d_1 (Å)	$2\Theta_{\text{макс.инт.}}$, град	I_0 макс.инт.	$d_{\text{макс.инт.}}$ (Å)	Степень кристалличности, %
1	Хитозан ММ = 124 кДа, СД = 83 %	9,34	9,46	19,90	94,0	4,46	54
2	Ацетилированный хитозан (получен из образца 1) СД 10,4 %	9,13	9,68	19,34	161,0	4,58	57
3	Карбоксиметилхитин (полученный из образца 2)	9,18	9,63	19,40	165,0	4,57	52

Примечание. Θ – угол падения рентгеновского луча, d – межплоскостное расстояние, I_0 – максимальная интенсивность.

На дифрактограммах хитозана, хитина и карбоксиметилхитина (рис. 5, табл. 3) положение пиков с максимальной интенсивностью I_0 находится в диапазоне $2\Theta = 19,40\text{--}19,90^\circ$. Им соответствуют межплоскостные расстояния $d = 4,46\text{--}4,58$ Å. Для межплоскостных расстояний $d = 9,46\text{--}9,68$ Å на дифрактограммах присутствуют пики при $2\Theta = 9,18\text{--}9,34^\circ$. Для хитозана положение максимального пика наблюдается при $2\Theta = 19,90^\circ$, кроме того, при $2\Theta = 9,34^\circ$ обнаружен пик, которому соответствует межплоскостное расстояние $d = 9,46$ Å. Полученные результаты согласуются с литературными данными по изучению дифракции крабового хитина и его производных (Focher et al., 1992). У ацетилированного хитозана (хитина) положение

пика с максимальной интенсивностью соответствует $2\Theta = 19,34^\circ$ и межплоскостному расстоянию $d = 4,58 \text{ \AA}$; также обнаружен пик при $2\Theta = 9,13^\circ$ для межплоскостного расстояния $d = 9,68 \text{ \AA}$.

Для карбоксиметилхитина получена дифрактограмма с практически идентичным положением пиков, как у исходного хитина. Для него положение пика с максимальной интенсивностью соответствует $2\Theta = 19,40^\circ$ в области межплоскостного расстояния $d = 4,57 \text{ \AA}$, также обнаружен пик в области межплоскостного расстояния $d = 9,63 \text{ \AA}$ при $2\Theta = 9,18^\circ$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что модификация хитозана с помощью реакций ацетилирования и карбоксиметилирования практически не влияет на положение пиков на дифрактограммах (2Θ находятся в пределах $9,18\text{--}9,34$ град) и положения межплоскостных расстояний, которым эти пики соответствуют ($4,46\text{--}4,58 \text{ \AA}$). Таким образом, степень кристалличности исходного хитозана, ацетилированных и карбоксиметилированных образцов изменяется незначительно в диапазоне $52\text{--}57 \%$.

Заключение

Целью данного исследования была разработка способа получения производного хитина – карбоксиметилхитина и выбор условий синтеза, необходимых для обеспечения хорошей растворимости карбоксиметилированного производного в водных средах. В качестве сырья использован хитозан, полученный из панцирей камчатского краба и краба-стригуна. Установлены необходимые условия ацетилирования хитозана (концентрация уксусного ангидрида 20% , время реакции 15 мин) и последующего карбоксиметилирования хитина (время реакции 7 суток), позволяющие получить водорастворимые образцы, имеющие близкий химический состав. Содержание карбоксиметильных групп в карбоксиметилхитине составило 38% , что в $1,7$ раза превышает их содержание в полимере при карбоксиметилировании по методикам, описанным в литературе.

Карбоксиметилхитин, полученный по разработанному методу, был проанализирован на растворимость в воде, определено его молекулярно-массовое распределение по данным ВЭЖХ и структурные свойства по данным рентгенофазного анализа. Показано, что растворимость карбоксиметилхитина увеличивается с увеличением pH и составляет около 82% от массы полимера при pH $8,0$. Степень кристалличности исходного хитозана, ацетилированных и карбоксиметилированных образцов отличается незначительно и находится в диапазоне $52\text{--}57 \%$. При характеристике молекулярно-массового распределения карбоксиметилхитина из панциря краба-стригуна обнаружено наличие шести основных фракций с молекулярными массами от $0,05$ до $656,40 \text{ kDa}$. Наибольший вклад (67%) вносит фракция с молекулярной массой 35 kDa .

В целом данное исследование вносит ценные сведения в области получения водорастворимых карбоксиметилированных производных хитозана из отходов промышленной переработки ракообразных и подчеркивает важность современных подходов к комплексной переработке морских биоресурсов. Проведенное исследование может быть полезно для предприятий, занимающихся промышленной добычей и переработкой крабов для решения задач безотходного использования сырья и получения при этом востребованных на рынке биотехнологий биополимеров.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-16-00064.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Боймиразев А. С., Бердимбетова Г. Е., Карлыбаева Б. П. Эксклюзионная жидкостная хроматография карбоксиметилхитина и карбоксиметилхитозана из рачков *Artemia Parthenogenetica* Аральского моря // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2024. Т. 60, № 1. С. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-1-45-52>. EDN: JHIAIP2.
- Вихорева Г. А., Роговина С. З., Пчелко О. М., Гальбрайт Л. С. Фазовое состояние и реологические свойства системы хитозан – уксусная кислота – вода // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2001. Т. 43, № 6. С. 1079–1084. EDN: FKLAKT.
- Кличева О. Б., Рашидова С. Ш. Реакции карбоксиметилирования хитозана *Bombyx mori* // Известия Уфимского научного центра РАН. 2016. № 3–1. С. 39–41. EDN: WJUOFJ.
- Новиков В. Ю., Деркач С. Р., Коновалова И. Н., Кучина Ю. А. [и др.]. Хитозан из панцирей ракообразных северных морей: получение и физико-химические свойства // Фундаментальная гликобиология : сб. материалов IV Всерос. конф., Киров, 23–28 сентября 2018 г. Киров, 2018. С. 136–137. EDN YASKFV.
- Новиков В. Ю., Коновалова И. Н., Долгопятова Н. В. Химические основы технологии получения хитина и его производных из панциря ракообразных. СПб. : ГИОРД, 2012. 208 с. EDN: TGEHRB.

- Пестов А. В., Ятлук Ю. Г. Карбоксиалкилированные производные хитина и хитозана. Екатеринбург : Ин-т органического синтеза УрО РАН, 2007. 102 с. EDN: QKBQAB.
- Радевич Т. В., Варламов В. П., Евдокимов И. А., Алиева Л. Р. [и др.]. Использование хитозана в производстве молочных продуктов // Труды Белорусского государственного университета. Сер. Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем. 2014. Т. 9, № 2. С. 181–190. EDN: FRSZTI.
- Хитин и хитозан. Получение, свойства и применение / под ред. К. Г. Скрыбина [и др.]. М. : Наука, 2002. 365 с. EDN: RVYMDH.
- Chen L., Du Y., Zeng X. Relationships between the molecular structure and moisture-absorption and moisture-retention abilities of carboxymethyl chitosan: II. Effect of degree of deacetylation and carboxymethylation // Carbohydrate Research. 2003a. Vol. 338, Iss. 4. P. 333–340. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(02\)00462-7](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(02)00462-7).
- Chen L., Tian Z., Du Y. Synthesis and pH sensitivity of carboxymethyl chitosan-based polyampholyte hydrogels for protein carrier matrices // Biomaterials. 2004. Vol. 25, Iss. 17. P. 3725–3732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2003.09.100>.
- Chen X.-G., Park H.-J. Chemical characteristics of O-carboxymethyl chitosans related to the preparation conditions // Carbohydrate Polymers. 2003b. Vol. 53, Iss. 4. P. 355–359. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00051-1).
- Focher B., Naggi A., Torri G., Cosani A. [et al.]. Chitosans from *Euphausia superba*. 2: Characterization of solid state structure // Carbohydrate Polymers. 1992. Vol. 18, Iss. 1. P. 43–49. DOI: [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(92\)90186-T](https://doi.org/10.1016/0144-8617(92)90186-T).
- Gao J., Xu Y., Zheng Y., Wang X. [et al.]. pH-sensitive carboxymethyl chitosan hydrogels via acid-labile ortho ester linkage as an implantable drug delivery system // Carbohydrate Polymers. 2019. Vol. 225. Article number: 115237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115237>.
- Islam Md. M., Islam R., Hassan S. M. M., Karim Md. R. [et al.]. Carboxymethyl chitin and chitosan derivatives: Synthesis, characterization and antibacterial activity // Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. 2023. Vol. 5. Article number: 100283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100283>.
- Jung J., Zhao Y. Impact of the structural differences between α - and β -chitosan on their depolymerizing reaction and antibacterial activity // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2013. Vol. 61, Iss. 37. P. 8783–8789. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf4018965>.
- Kurita K., Sannan T., Iwakura Y. Studies on chitin, 4. Evidence for formation of block and random copolymers of *N*-acetyl-D-glucosamine and D-glucosamine by hetero- and homogeneous hydrolyses // Die Makromolekulare Chemie. 1977. Vol. 178, Iss. 12. P. 3197–3202. DOI: <https://doi.org/10.1002/macp.1977.021781203>.
- Lei M., Huang W., Jin Z., Sun J. [et al.]. Effect of molecular structure and ionization state on aggregation of carboxymethyl chitosan: A molecular dynamics study // Carbohydrate Polymers. 2022. Vol. 297. Article number: 119993. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119993>.
- Mohammed A. S. A., Naveed M., Jost N. Polysaccharides; classification, chemical properties, and future perspective applications in fields of pharmacology and biological medicine (a review of current applications and upcoming potentialities) // Journal of Polymers and the Environment. 2021. Vol. 29. P. 2359–2371. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02052-2>.
- Mourya V., Inamdara N. N., Tiwari A. Carboxymethyl chitosan and its applications // Advanced Materials Letters. 2010. Vol. 1, Iss. 1. P. 11–33. DOI: <https://doi.org/10.5185/amlett.2010.3108>.
- Muzzarelli R. A. A., Tanfani F., Emanuelli M., Mariotti S. *N*-(carboxymethylidene)chitosans and *N*-(carboxymethyl)chitosans: Novel chelating polyampholytes obtained from chitosan glyoxylate // Carbohydrate Research. 1982. Vol. 107, Iss. 2. P. 199–214. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)80539-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)80539-X).
- Novikov V. Yu., Derkach S. R., Konovalova I. N., Dolgopyatova N. V. [et al.]. Mechanism of heterogeneous alkaline deacetylation of chitin: A review // Polymers. 2023. Vol. 15, Iss. 7. Article number: 1729. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071729>.
- Patel R., Mevada S., Shukla S., Bhattacharya S. [et al.]. Carboxymethyl chitosan for neurological drug delivery: Current trends and future prospects // International Journal of Biological Macromolecules. 2026. Vol. 344, Part 2. Article number: 150488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.150488>.
- Santos V. P., Marques N. S. S., Maia P. C. S. V., de Lima M. A. B. [et al.]. Seafood waste as attractive source of chitin and chitosan production and their applications // International Journal of Molecular Sciences. 2020. Vol. 2, Iss. 12. Article number: 4290. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21124290>.
- Schröder V., Mitea G., Rău I., Apetroaei M. R. [et al.]. Chitosan mixtures from marine sources: A comparative study of biological responses and practical applications // Polysaccharides. 2025. Vol. 6, Iss. 3. Article number: 80. DOI: <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6030080>.

- Wang W., Xue C., Mao X. Chitosan: Structural modification, biological activity and application // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 164. P. 4532–4546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.042>.
- Younes I., Rinaudo M. Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications // *Marine Drugs*. 2015. Vol. 13, Iss. 3. P. 1133–1174. DOI: <https://doi.org/10.3390/md13031133>.
- Zhang H., Wu X., Quan L., Ao Q. Characteristics of marine biomaterials and their applications in biomedicine // *Marine Drugs*. 2022. Vol. 20, Iss. 6. Article number: 372. DOI: <https://doi.org/10.3390/md20060372>.

References

- Boymirzaev, A. S., Berdimbetova, G. E., Karlybaeva, B. P. 2024. Size exclusion liquid chromatography of carboxymethyl chitin and carboxymethyl chitosan from crustaceans (*Artemia Parthenogenetica*) of the Aral Sea. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*, 60(1), pp. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-1-45-52>. EDN: JHIAIP2. (In Russ.)
- Vikhoreva, G. A., Rogovina, S. Z., Pchelko, O. M., Gal'brajkh, L. S. 2001. The phase state and rheological properties of chitosan – acetic acid – water system. *Polymer Science, Series B*, 43(6), pp. 1079–1084. EDN: FKLAKT. (In Russ.)
- Klicheva, O. B., Rashidova, S. Sh. 2016. Reactions of chitosan *Bombyx mori* carboxymethylation. *Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre*, 3–1, pp. 39–41. EDN: WJUOFJ. (In Russ.)
- Novikov, V. Yu., Derkach, S. R., Konovalova, I. N., Kuchina, Yu. A. et al. 2018. Chitosan from the shells of crustaceans of the northern seas: Production and physicochemical properties. Coll. of materials of the IV All-Russian conference, Kirov, September 23–28, 2018. Kirov, pp. 136–137. EDN YASKFV. (In Russ.)
- Novikov, V. Yu., Konovalova, I. N., Dolgopyatova, N. V. 2012. Chemical foundations of the technology for obtaining chitin and its derivatives from crustacean shells. St. Petersburg. EDN: TGEHRB. (In Russ.)
- Pestov, A. V., Yatluk, Yu. G. 2007. Carboxyalkylated derivatives of chitin and chitosan. Ekaterinburg. EDN: QKBQAB. (In Russ.)
- Radevich, T. V., Varlamov, V. P., Evdokimov, I. A., Alieva, L. R. et al. 2014. The usage of chitosan in the manufacture of dairy products. *Proceedings of the Belarusian State University*, 9(2), pp. 181–190. EDN: FRSZTI. (In Russ.)
- Chitin and chitosan: Production, properties and application. Eds. K. G. Skryabin, G. A. Vikhoreva, V. P. Varlamov. Moscow. EDN: RVYMDH. (In Russ.)
- Chen, L., Du, Y., Zeng, X. 2003a. Relationships between the molecular structure and moisture-absorption and moisture-retention abilities of carboxymethyl chitosan: II. Effect of degree of deacetylation and carboxymethylation. *Carbohydrate Research*, 338(4), pp. 333–340. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(02\)00462-7](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(02)00462-7).
- Chen, L., Tian, Z., Du, Y. 2004. Synthesis and pH sensitivity of carboxymethyl chitosan-based polyampholyte hydrogels for protein carrier matrices. *Biomaterials*, 25(17), pp. 3725–3732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2003.09.100>.
- Chen, X.-G., Park, H.-J. 2003b. Chemical characteristics of O-carboxymethyl chitosans related to the preparation conditions. *Carbohydrate Polymers*, 53(4), pp. 355–359. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00051-1).
- Focher, B., Naggi, A., Torri, G., Cosani, A. et al. 1992. Chitosans from *Euphausia superba*. 2: Characterization of solid state structure. *Carbohydrate Polymers*, 18(1), pp. 43–49. DOI: [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(92\)90186-T](https://doi.org/10.1016/0144-8617(92)90186-T).
- Gao, J., Xu, Y., Zheng, Y., Wang, X. et al. 2019. pH-sensitive carboxymethyl chitosan hydrogels via acid-labile ortho ester linkage as an implantable drug delivery system. *Carbohydrate Polymers*, 225. Article number: 115237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115237>.
- Islam, Md. M., Islam, R., Hassan, S. M. M., Karim, Md. R. et al. 2023. Carboxymethyl chitin and chitosan derivatives: Synthesis, characterization and antibacterial activity. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5. Article number: 100283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100283>.
- Jung, J., Zhao, Y. 2013. Impact of the structural differences between α - and β -chitosan on their depolymerizing reaction and antibacterial activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(37), pp. 8783–8789. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf4018965>.
- Kurita, K., Sannan, T., Iwakura, Y. 1977. Studies on chitin, 4. Evidence for formation of block and random copolymers of *N*-acetyl-D-glucosamine and D-glucosamine by hetero- and homogeneous hydrolyses. *Die Makromolekulare Chemie*, 178(12), pp. 3197–3202. DOI: <https://doi.org/10.1002/macp.1977.021781203>.
- Lei, M., Huang, W., Jin, Z., Sun, J. et al. 2022. Effect of molecular structure and ionization state on aggregation of carboxymethyl chitosan: A molecular dynamics study. *Carbohydrate Polymers*, 297. Article number: 119993. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119993>.

- Mohammed, A. S. A., Naveed, M., Jost, N. 2021. Polysaccharides; classification, chemical properties, and future perspective applications in fields of pharmacology and biological medicine (a review of current applications and upcoming potentialities). *Journal of Polymers and the Environment*, 29, pp. 2359–2371. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02052-2>.
- Mourya, V., Inamdara, N. N., Tiwari, A. 2010. Carboxymethyl chitosan and its applications. *Advanced Materials Letters*, 1(1), pp. 11–33. DOI: <https://doi.org/10.5185/amlett.2010.3108>.
- Muzzarelli, R. A. A., Tanfani, F., Emanuelli, M., Mariotti, S. 1982. N-(carboxymethylidene)chitosans and N-(carboxymethyl)chitosans: Novel chelating polyampholytes obtained from chitosan glyoxylate. *Carbohydrate Research*, 107(2), pp. 199–214. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)80539-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)80539-X).
- Novikov, V. Yu., Derkach, S. R., Konovalova, I. N., Dolgopyatova, N. V. et al. 2023. Mechanism of heterogeneous alkaline deacetylation of chitin: A review. *Polymers*, 15(7). Article number: 1729. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071729>.
- Patel, R., Mevada, S., Shukla, S., Bhattacharya S. et al. 2026. Carboxymethyl chitosan for neurological drug delivery: Current trends and future prospects. *International Journal of Biological Macromolecules*, 344, Part 2. Article number: 150488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.150488>.
- Santos, V. P., Marques, N. S. S., Maia, P. C. S. V., de Lima, M. A. B. et al. 2020. Seafood waste as attractive source of chitin and chitosan production and their applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 2(12). Article number: 4290. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21124290>.
- Schröder, V., Mitea, G., Rău, I., Apetroaei, M. R. et al. 2025. Chitosan mixtures from marine sources: A comparative study of biological responses and practical applications. *Polysaccharides*, 6(3). Article number: 80. DOI: <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6030080>.
- Wang, W., Xue, C., Mao, X. 2020. Chitosan: Structural modification, biological activity and application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, pp. 4532–4546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.042>.
- Younes, I., Rinaudo, M. 2015. Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications. *Marine Drugs*, 13(3), pp. 1133–1174. DOI: <https://doi.org/10.3390/md13031133>.
- Zhang, H., Wu, X., Quan, L., Ao, Q. 2022. Characteristics of marine biomaterials and their applications in biomedicine. *Marine Drugs*, 20(6). Article number: 372. DOI: <https://doi.org/10.3390/md20060372>.

Сведения об авторах

Новиков Виталий Юрьевич – ул. Академика Книповича, 6, г. Мурманск, Россия, 183038;
Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства
и океанографии ("ПИНРО" им. Н. М. Книповича), канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: nowit@pinro.vniro.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1733-5838>

Vitaly Yu. Novikov – 6 Akademika Knipovicha Str., Murmansk, Russia, 183038;
Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (The Polar Branch of VNIRO),
Cand. Sci. (Chemistry), Leading Research Fellow,
e-mail: nowit@pinro.vniro.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1733-5838>

Долгопятова Наталия Владимировна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: dolgopyatovanv@mauniver.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8124-9788>

Natalia V. Dolgopyatova – 13 Sportinaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: dolgopyatovanv@mauniver.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8124-9788>

Коновалова Ирина Никандровна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, канд. техн. наук, профессор;
e-mail: konovalovain@mauniver.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1116-0205>

Irina N. Konovalova – 13 Sportinaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: konovalovain@mauniver.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1116-0205>

Кучина Юлия Анатольевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: kuchinayua@mauniver.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3419-1442>

Yulia A. Kuchina – 13 Sportinaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Engineering), Senior Research Fellow;
e-mail: kuchinayua@mauniver.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3419-1442>

Глухарев Андрей Юрьевич – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, канд. техн. наук, науч. сотрудник;
e-mail: GlukharevAYu@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6083-546X>

Andrei Yu. Glukharev – 13 Sportinaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Engineering), Research Fellow;
e-mail: GlukharevAYu@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6083-546X>

Деркач Светлана Ростиславовна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, д-р хим. наук, гл. науч. сотрудник;
e-mail: derkachsr@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5871-9320>

Svetlana R. Derkach – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Dr Sci. (Chemistry), Chief Researcher;
e-mail: derkachsr@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5871-9320>

УДК 664.38; 543.645.6; 577.112.6

Исследование взаимодействия биологически активных пептидов из сои с молекулами АПФ и ДПП-4 методом молекулярного докинга

В. В. Фоменко, Н. А. Большев, Н. Г. Машенцева, И. А. Детинкин*, Д. И. Алексаночкин

*Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Россия;

e-mail: detinkin02@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0985-9505>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
08.05.2026;

получена
после доработки
05.06.2026;

принята
к публикации
29.06.2026

Ключевые слова:

пептиды,
ингибиторы АПФ,
ингибиторы ДПП-4,
молекулярный докинг,
биоинформатика

Методом молекулярного докинга оценена ингибирующая активность двух биологически активных пептидов соевого происхождения (IIVVQGKGAIGF и VIPPGVPYWTYNT) в отношении ангиотензинпревращающего фермента (АПФ) и дипептидилпептидазы-4 (ДПП-4). В качестве эталонов сравнения использованы синтетические препараты каптоприл и ситаглиптин. Трехмерные структуры пептидов предсказаны с помощью веб-сервера PEP-FOLD4, процедура докинга выполнена в программе AutoDock Vina на основе кристаллических структур из базы PDB (коды 1O86 и 1X70). Результаты показали, что оба пептида демонстрируют статистически значимо более высокую аффинность к АПФ (от –9,07 до –10,46 ккал/моль) по сравнению с каптоприлом (–5,40 ккал/моль). В случае ДПП-4 пептид VIPPGVPYWTYNT превзошел ситаглиптин (–8,56 против –7,86 ккал/моль), тогда как IIVVQGKGAIGF уступил референсу по энергии связывания. Анализ межмолекулярных взаимодействий выявил образование множественных связей с ключевыми остатками активных центров, однако лишь часть контактов локализованы непосредственно в каталитической зоне, что указывает на высокую общую аффинность при потенциально меньшей селективности по сравнению с синтетическими аналогами. Полученные *in silico* данные подтверждают высокий терапевтический потенциал исследуемых пептидов и обосновывают необходимость их химического синтеза и дальнейшей экспериментальной проверки *in vitro* и *in vivo*.

Для цитирования

Фоменко В. В. и др. Исследование взаимодействия биологически активных пептидов из сои с молекулами АПФ и ДПП-4 методом молекулярного докинга. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 361–376. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-361-376>.

Study of the interaction of biologically active soy peptides with ACE and DPP-4 molecules using molecular docking

Victoria V. Fomenko, Nikolaj A. Bolshev, Natalia G. Mashentseva,

Ilya A. Detinkin*, Denis I. Aleksanochkin

*Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, Russia;

e-mail: detinkin02@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0985-9505>

Article info

Received
08.05.2026;

received
in revised form
05.06.2026;

accepted
29.06.2026

Key words:

peptides,
ACE inhibitors,
DPP-4 inhibitors,
molecular docking,
bioinformatics

Abstract

The inhibitory activity of two biologically active peptides of soy origin (IIVVQGKGAIGF and VIPPGVPYWTYNT) against angiotensin converting enzyme (ACE) and dipeptidyl peptidase-4 (DPP-4) has been evaluated by molecular docking. Synthetic drugs captopril and sitagliptin have been used as comparison standards. The three-dimensional structures of the peptides are predicted using the PEP-FOLD4 web server, and the docking procedure is performed in the AutoDock Vina program based on crystal structures from the PDB database (codes 1O86 and 1X70). The results have shown that both peptides demonstrate statistically significantly higher affinity for ACE (from –9.07 to –10.46 kcal/mol) compared with captopril (–5.40 kcal/mol). In the case of DPP-4, the VIPPGVPYWTYNT peptide has surpassed sitagliptin (–8.56 versus –7.86 kcal/mol), while IIVVQGKGAIGF is inferior to the reference in binding energy. The analysis of intermolecular interactions has revealed the formation of multiple bonds with key residues of active sites, however, only a part of the contacts are localized directly in the catalytic zone, which indicates a high overall affinity with potentially lower selectivity compared to synthetic analogues. The data obtained *in silico* confirm the high therapeutic potential of the studied peptides and substantiate the need for their chemical synthesis and further experimental verification *in vitro* and *in vivo*.

For citation

Fomenko, V. V. et al. 2026. Study of the interaction of biologically active soy peptides with ACE and DPP-4 molecules using molecular docking. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 361–376. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-361-376>.

Введение

Биологически активные пептиды представляют собой небольшие изолированные фрагменты белков, которые обладают уникальной физиологической активностью, выходящей за рамки основных потребностей в питании (Fan et al., 2022; Guo et al., 2026). Эти вещества образуются при гидролитическом расщеплении белковых молекул и проявляют широкий спектр биологической активности: противовоспалительное, антиоксидантное, нейропротекторное, противомикробное действие (Liu et al., 2022; Wang et al., 2022a; Tornesello et al., 2020; Zhang et al., 2023). Биоактивные пептиды, получаемые из пищевых продуктов, представляют большой интерес для изучения, поскольку они могут быть полезны для здоровья и способствовать лечению различных заболеваний (Nasri et al., 2022). Существуют различные способы получения биологически активных пептидов – ферментативный гидролиз, химический гидролиз, ферментация микроорганизмами (Nasri et al., 2022; Akbarian et al., 2022; Wang et al., 2022b). Использование протеаз – наиболее распространенный способ получения биоактивных пептидов, поскольку для достижения нужной степени гидролиза требуется меньше времени, а сам процесс хорошо воспроизводим и легко контролируется. В этом процессе используются различные ферментные препараты, такие как пепсин, бромелаин, трипсин, папаин и т. д. при оптимальном для них водородном показателе и температуре (Akbarian et al., 2022; Wang et al., 2022b). Источниками биологически активных пептидов могут быть морепродукты, мясные и молочные продукты, растительные белки и т. д. (Ovchinnikova, 2021; Guha et al., 2021; Montesano et al., 2020).

Среди наиболее интересных свойств биоактивных пептидов из пищевых продуктов является свойство ингибировать ангиотензинпревращающий фермент (АПФ) и дипептидилпептидазу 4 (ДПП-4). Несмотря на более низкую фармакологическую эффективность, чем у синтетических препаратов, потенциал пептидов как функциональных пищевых ингредиентов получил широкое признание (Zhao et al., 2025). Они могут применяться в качестве пищевых ингредиентов как в очищенном виде, так и в составе белковых гидролизатов, позволяя получать обогащенные биологически активными веществами функциональные продукты питания (Zambrowicz et al., 2013; Peighambardoust et al., 2021; Lorenzo et al., 2018).

Ингибиторы АПФ часто назначаются для лечения гипертонии и других хронических заболеваний, в том числе сердечной недостаточности и хронической болезни почек. Эти препараты подавляют активность АПФ – фермента, который отвечает за превращение ангиотензина I в ангиотензин II. Подавление синтеза ангиотензина II способствует снижению артериального давления. Ингибиторы АПФ являются препаратами первой линии для лечения артериальной гипертензии наряду с тиазидными диуретиками, блокаторами кальциевых каналов и блокаторами рецепторов ангиотензина (Cutrell et al., 2023). Современные ингибиторы АПФ могут вызывать некоторые побочные эффекты, среди которых наиболее распространены гипотония после приема первой дозы, нарушение функции почек, гиперкалиемия и кашель (Zheng et al., 2022a). Биологически активные пептиды, способные ингибировать АПФ, могут стать перспективными натуральными веществами, применяемыми для лечения и профилактики гипертонии (Jo et al., 2024).

ДПП-4 – это сериновая протеаза, ингибирование которой представляет значительный интерес в контексте разработки новых методов лечения сахарного диабета 2-го типа. Также было обнаружено, что ингибиторы ДПП-4 полезны для пациентов с COVID-19 (Petrov et al., 2025). ДПП-4 запускает катализ инсулинотропных гормонов, снижая уровень эндогенного инсулина и повышая уровень глюкозы в плазме крови. В области разработки лекарственных препаратов ингибиторы ДПП-4 открывают широкие возможности для создания гипогликемических средств, регулирующих активность инкретинов и снижающих уровень глюкозы в крови. Однако применение синтетических препаратов может быть сопряжено с различными побочными эффектами (Chhabria et al., 2022). Также как и для АПФ, биологически активные пептиды, ингибирующие ДПП-4, рассматриваются как подходящие вещества для длительного терапевтического воздействия у больных сахарным диабетом 2-го типа (Zhao et al., 2025).

Методы биоинформатики открывают новые возможности в предсказании биоактивности пептидов. Одним из таких методов является молекулярный докинг, с помощью которого можно визуализировать механизм взаимодействия между лигандами и рецепторами на атомном уровне. Эта возможность делает молекулярный докинг самым популярным методом биоинформатики для изучения механизма действия факторов, влияющих на фармакологию (Du et al., 2023).

В ходе исследования влияния трипсина и пепсина на белок сои в нашей прошлой работе были идентифицированы пептиды IIVVQGKGAI GF и VIPPGVPYWTYNT, для которых по результатам *in silico* анализа были предсказаны способности к ингибированию АПФ и ДПП-4 при помощи инструмента BIOPEP-UWM, однако моделирования взаимодействия этих пептидов с АПФ и ДПП-4 не проводилось (Фоменко и др., 2026).

Целью работы является использование методов молекулярного докинга для оценки способности новых пептидных молекул ингибировать АПФ и ДПП-4, сравнение рассчитанных параметров связывания с характеристиками традиционных препаратов для оценки перспективности данных пептидов в качестве основы для дальнейших исследований *in vitro* и *in vivo*, а также применения в качестве функциональных ингредиентов в продуктах питания.

Материалы и методы

Подготовка рецепторных моделей и лигандов

Для проведения молекулярного докинга в качестве рецепторных моделей были использованы кристаллические структуры ферментов дипептидилпептидазы-4 (ДПП-4, PDB ID: 1X70) и ангиотензинпревращающего фермента (АПФ, PDB ID: 1O86), депонированные в базе данных Protein Data Bank (URL: <https://www.rcsb.org/>).

Координаты центра области для молекулярного докинга определяли на основе анализа положения ко-кристаллизованных лигандов в исходных рентгеновских структурах белков-мишеней, а также с учетом литературных данных о локализации субстрат-связывающих карманов. Для этого трехмерные модели белков (АПФ, код PDB 1O86; ДПП-4, код PDB 1X70) загружали в программу PyMOL. С помощью инструмента выбора выделяли атомы ко-кристаллизованных лигандов, после чего определяли геометрический центр масс выделенной группы атомов. Полученные координаты центра масс использовали в качестве центра области для докинга. Для АПФ центр был установлен в точке (41,68; 38,31; 46,65) Å, для ДПП-4 – в точке (77,58; 55,80; 36,40) Å. Размеры области подбирали таким образом, чтобы они полностью охватывали предполагаемый сайт связывания. Стоит отметить, что для модели ДПП-4 активный центр был обнаружен в цепи В. Цепь А от цепи В не отличается по геометрии и аминокислотному составу, каждая из них формирует собственный активный центр. Поэтому выбор цепи В в качестве референса для определения координат центра области докинга является корректным, а полученные результаты достоверными.

Перед проведением докинга рецепторные структуры были подвергнуты стандартной подготовке с использованием пакета AutoDock Tools v.1.5.7. Выполнены следующие операции: удаление молекул воды и посторонних лигандов, не участвующих в катализе; добавление полярных атомов водорода; присвоение частичных зарядов по методу Гастейгера; конвертация форматов файлов в .pdbqt, совместимый с AutoDock Vina.

Структуры референсных лигандов – каптоприла (ингибитор АПФ) и ситаглиптина (ингибитор ДПП-4) – были получены из базы данных PubChem (URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>) в формате .sdf. Конвертация форматов и генерация трехмерных моделей осуществлялись с помощью программного обеспечения Open Babel v.3.1.1, позволяющего обеспечить корректное присвоение типов атомов и стереохимии. Для визуализации химической структуры лигандов использовали сервисы: PubChem Sketcher V2.4 (URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>) и PepDraw (URL: <https://pepdraw.com/>).

Модели трехмерной структуры пептидных лигандов были построены методом *de novo* с использованием веб-сервера PEP-FOLD4 (URL: <https://bioserv.rpbs.univ-paris-diderot.fr/services/PEP-FOLD4/>). Данный сервер предназначен для предсказания структуры коротких линейных пептидов, состоящих из 5–40 аминокислот. Для каждой последовательности генерируется множество моделей (по умолчанию 100), которые затем группируются в кластеры по их структурному сходству.

Параметры молекулярного докинга

Докинг проводили с использованием программы AutoDock Vina v.1.2.7. Параметры поисковой области (grid box) были установлены следующим образом: размер области 50×50×50; центр – координаты, указанные выше, определенные на основе координат ко-кристаллизованных лигандов и каталитических остатков; остальные параметры по умолчанию. Для каждого лиганда выполнялось 9 независимых запусков. Выходные данные включали до 9 наиболее энергетически выгодных конформаций с энергией связывания в пределах 3 ккал/моль от наилучшего результата. Для дальнейшего анализа выбирали модель с наименьшей энергией связывания.

Визуализацию молекулярных структур и анализ межмолекулярных взаимодействий проводили с использованием программы Discovery Studio Visualizer (Dassault Systèmes, Франция). Конвертация файлов формата .pdbqt обратно в .pdb для визуализации выполнялась в PyMOL v.2.5. Для построения двумерных моделей взаимодействия использовали LigPlot+. При этом для детальной оценки межмолекулярных связей анализ проводили согласно данным Discovery Studio Visualizer, так как данная программа учитывает слабые взаимодействия (гидрофобные, электростатические и прочее), а также предоставляет возможность удобно работать с информацией, воспроизводя таблицу с детальным описанием стыковочных данных.

Валидация и статистический анализ

Значимость различий в энергиях связывания между группами лигандов оценивали с помощью двухвыборочного *t*-теста Стьюдента (двусторонний, уровень значимости $\alpha = 0,05$) с поправкой Бонферрони для множественных сравнений. Расчеты выполняли в программе Microsoft Excel.

Молекулярно-структурная характеристика рецепторов и лигандов

На рис. 1 представлены молекулярные структуры изучаемых пептидов и референсных молекул.

Каптоприл широко используется для лечения гипертонии и сердечной недостаточности и является мощным и специфическим ингибитором АПФ. Он имеет молекулярную формулу C₉H₁₅NO₃S и молекулярную массу около 217 Да (Khamanga et al., 2011; Stoiljkovic et al., 2025). Ситаглиптин является пероральным

ингибитором ДПП-4, способным улучшать контроль уровня глюкозы в крови, подавляя активность этого фермента и тем самым замедляя инактивацию глюкагоноподобного пептида-1 и глюкозозависимого инсулиотропного полипептида. Эмпирическая химическая формула этого вещества $C_{16}H_{15}F_6N_5O$, а молекулярная масса равна примерно 407 Да (Sotoudeheian et al., 2025).

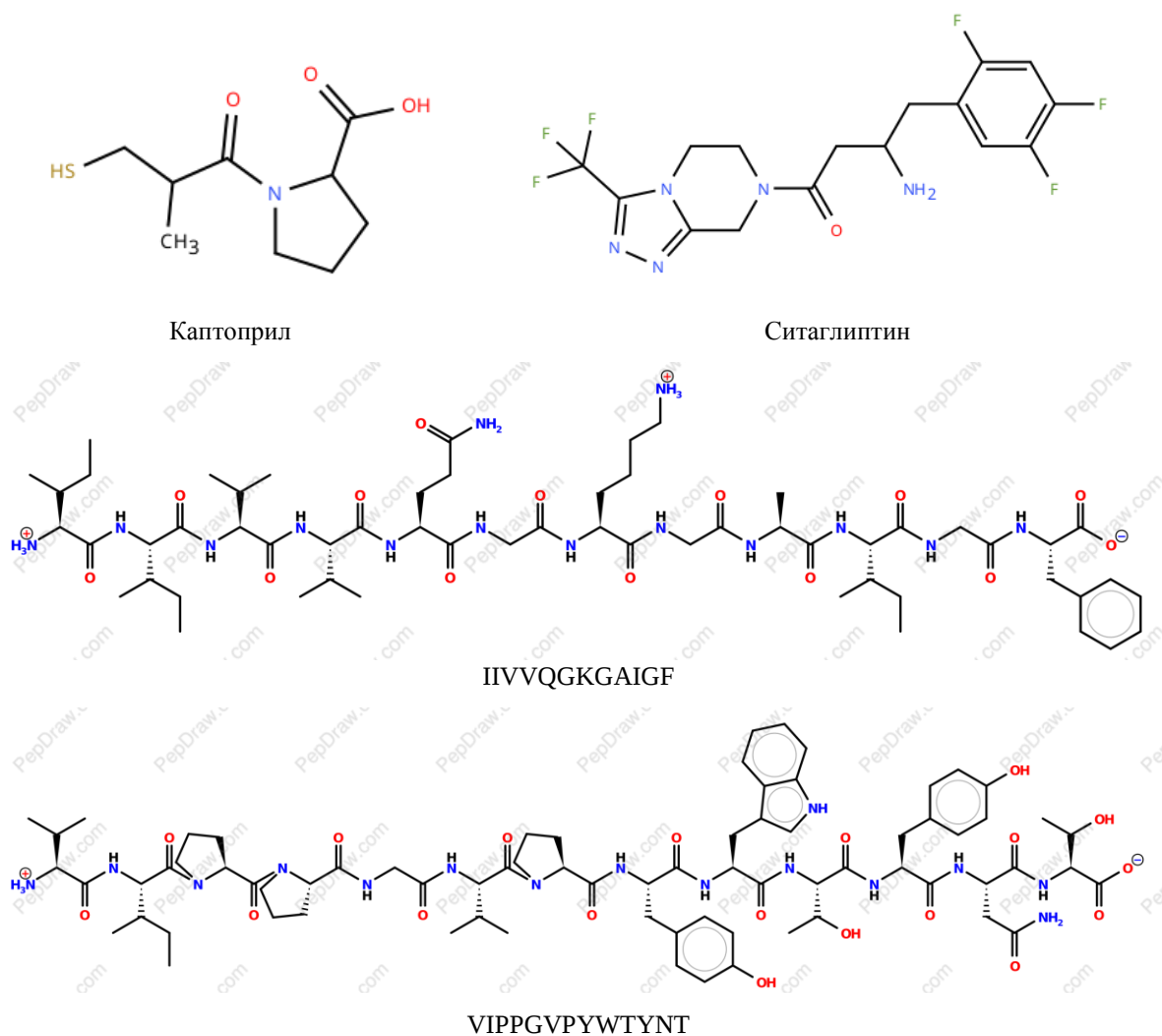


Рис. 1. Химические структуры изучаемых лигандов
Fig. 1. Chemical structures of the studied ligands

Ангиотензинпревращающий фермент (АПФ) представляет собой цинк-зависимую дипептидазу. Данный фермент выполняет ключевую биологическую функцию в ренин-ангиотензиновой системе, катализируя превращение биологически неактивного ангиотензина I в мощный сосудосуживающий пептид – ангиотензин II. Это свойство превращает фермент в важную мишень для лечения гипертонии и сердечно-сосудистых заболеваний (Zheng et al., 2022a; Jo et al., 2024). АПФ человека состоит из двух доменов – N-домена и С-домена. Оба домена содержат цинк-связывающий мотив. АПФ имеет три основных активных узла (S1, S2 и S1'). Карман S1 включает остатки ALA354, GLU384 и TYR523; карман S2 – остатки GLN281, HIS353, LYS511, HIS513 и TYR520; карман S1' содержит остаток GLU162. Тетраэдрический комплекс, который Zn^{2+} образует с HIS387, HIS383 и GLU411, имеет решающее значение для аффинности связывания АПФ с ингибиторами (Jo et al., 2024; Wu et al., 2023; Zheng et al., 2022b; Shao et al., 2023).

ДПП-4 представляет собой мембраносвязанный белок, функционирующий в виде димера, состоящего из двух идентичных субъединиц. Данный фермент находится на поверхности клеток различных тканей и играет ключевую роль в клеточной сигнализации, воспалительных процессах и инактивации гормонов. ДПП-4 имеет три ключевых активных участка: S1 (TYR547, SER630, TYR631, VAL656, TRP659, TYR666, ASN710, VAL711 и HIS740), S2 (ARG125, GLU205, GLU206 и TYR662) и S3 (SER209, PHE357 и ARG358). Каталитическая триада (SER630, HIS740 и ASP708) находится в углублении, окруженном гидрофобными остатками. Остатки TYR547, TRP629 и LYS554 играют важную роль в связывании активного центра

комплексов фермента-ингибитора. Остаток TRP629 образует каталитический карман в ДПП-4, а TYR547 стабилизирует оксианион в каталитическом центре (Fang et al., 2025; Mathur et al., 2023).

Пептиды IIIVVQGKG AIGF и VIIPPGVPYWTYNT были обнаружены в гидролизатах соевого белка, обработанных последовательным гидролизом трипсином/пепсином и отдельно пепсином (обе последовательности присутствуют в различных субъединицах глицинина сои). Молекулярная масса пептидов составляла 1 200 и 1 506 Да соответственно. Для них были спрогнозированы свойства ингибировать АПФ и ДПП-4 при помощи базы данных BIOPEP-UWM в нашей прошлой работе (Фоменко и др., 2026).

Результаты и обсуждение

Анализ аффинности пептидов к ДПП-4 и АПФ

В ходе работы были проанализированы энергии связывания пептидов IIIVVQGKG AIGF и VIIPPGVPYWTYNT с АПФ и ДПП-4. В качестве эталонных молекул использовали каптоприл и ситаглиптин. В табл. 1 представлены энергии связывания используемых рецепторов с пептидами и эталонными молекулами.

Таблица 1. Энергии связывания изучаемых молекул с ДПП-4 и АПФ
Table 1. Binding energies of the studied molecules with DPP-4 and ACE

Рецептор		АПФ			ДПП-4		
Модел		Каптоприл	IIIVVQGKG AIGF	VIIPPGVPYW TYNT	Ситаглиптин	IIIVVQGKG AIGF	VIIPPGVPYW TYNT
Энергия связывания, ккал/моль	1	–5,601	–9,605	–10,945	–8,020	–7,119	–8,956
	2	–5,595	–9,570	–10,699	–8,020	–7,042	–8,851
	3	–5,496	–9,320	–10,607	–8,007	–7,016	–8,795
	4	–5,451	–8,862	–10,466	–7,933	–6,938	–8,524
	5	–5,409	–8,850	–10,364	–7,871	–6,883	–8,466
	6	–5,344	–8,824	–10,329	–7,856	–6,801	–8,448
	7	–5,187	–8,812	–10,229	–7,825	–6,796	–8,390
	8	–5,110	–8,725	–10,076	–7,622	–6,760	–8,334
	9	–4,997	–8,660	–10,042	–7,552	–6,734	–8,271
Среднее		–5,399	–9,071	–10,464	–7,856	–6,899	–8,559
Отклонение		0,214	0,369	0,296	0,170	0,137	0,246
t-критерий		–	1,86·10–12	1,46·10–16	–	9,36·10–10	5,18·10–6

Анализ энергии связывания по 9 независимым моделям показал, что для АПФ оба пептида продемонстрировали большую аффинность, чем референсный препарат каптоприл, причем различия были существенно значимые в сравнении с эталоном согласно *t*-тесту Стьюдента с двумя независимыми выборками. Пептид IIIVVQGKG AIGF продемонстрировал меньшую аффинность, чем ситаглиптин, причем различие в сравнении с эталоном являлось существенно значимым. В то же время пептид VIIPPGVPYWTYNT показал большую аффинность, чем ситаглиптин. Стандартное отклонение в контексте анализа демонстрирует, насколько результаты схожи друг с другом: чем меньше значение, тем сильнее независимые анализы совпадают по энергии связывания. Наименьшее отклонение наблюдалось у пептида IIIVVQGKG AIGF с ДПП-4, что, вероятно, обусловлено размером этой молекулы относительно активного центра.

Анализ межмолекулярных взаимодействий с АПФ

Подробная характеристика взаимодействия пептидов и референсного препарата каптоприла с каталитическим центром рецептора АПФ представлена в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики связывания лигандов с АПФ
Table 2. Binding characteristics of ligands with ACE

Лиганд	Всего связей	Связи с активным центром и вблизи него	Диапазон расстояний (Å)
Каптоприл	10	TYR523 (1 водородная связь, 1 гидрофобное взаимодействие) HIS353 (1 водородная связь) HIS513 (1 водородная связь) PHE457 (1 гидрофобное взаимодействие) ALA354 (1 гидрофобное взаимодействие) VAL380 (1 гидрофобное взаимодействие) HIS383 (1 гидрофобное взаимодействие) PHE527 (1 гидрофобное взаимодействие)	2,81–4,66

IIVVQGKGAIGF	30	GLU123 (5 водородных связей) TYR360 (2 водородные связи, 3 гидрофобных взаимодействия) ARG124 (2 водородные связи) TYR62 (1 водородная связь, 1 гидрофобное взаимодействие) TRP220 (1 водородная связь) TYR394 (1 водородная связь) THR92 (1 водородная связь) ASP121 (1 водородная связь) TRP357 (1 гидрофобное взаимодействие) ALA63 (1 гидрофобное взаимодействие) MET223 (1 гидрофобное взаимодействие) ARG402 (1 гидрофобное взаимодействие) ILE88 (1 гидрофобное взаимодействие) HIS387 (1 гидрофобное взаимодействие) PHE570 (1 гидрофобное взаимодействие) ILE204 (1 гидрофобное взаимодействие) ALA207 (1 гидрофобное взаимодействие) ALA208 (1 гидрофобное взаимодействие)	2,41–5,37
VIPPGVPYWTYNT	32	ASP358 (1 водородная связь) TYR523 (1 водородная связь) HIS410 (1 водородная связь) HIS387 (1 водородная связь) TYR360 (1 водородная связь) SER355 (1 водородная связь) SER516 (1 водородная связь) GLU123 (1 электростатическое взаимодействие) TRP357 (1 гидрофобное взаимодействие) TYR62 (1 водородная связь, 1 гидрофобное взаимодействие) ASN66 (2 водородные связи) ASN70 (1 водородная связь) LYS118 (1 водородная связь) ARG124 (1 водородная связь, 2 гидрофобных взаимодействия) TYR394 (1 водородная связь) ARG522 (1 водородная связь) TRP59 (1 водородная связь) TRP220 (2 гидрофобных взаимодействия) VAL518 (1 гидрофобное взаимодействие) MET223 (1 гидрофобное взаимодействие) ILE88 (1 гидрофобное взаимодействие) ALA63 (1 гидрофобное взаимодействие) LEU139 (2 гидрофобных взаимодействия) LEU140 (2 гидрофобных взаимодействия)	2,77–5,29

Взаимодействие каптоприла с АПФ

При докинге каптоприла с рецептором АПФ были обнаружены 3 классические водородные связи, 6 гидрофобных взаимодействий, а также одно дополнительное взаимодействие типа π -сульфидный контакт. Большинство выявленных контактов приходились на аминокислотные остатки активного центра, что свидетельствует о высокой селективности связывания.

В образовании водородных связей участвовали атомы остатков TYR523, HIS353 и HIS513 с расстояниями в диапазоне 2,81–2,97 Å. Гидрофобные взаимодействия были зафиксированы с остатками ALA354, VAL380, HIS383, PHE457, TYR523 и PHE527 в диапазоне расстояний 4,16–5,06 Å. Дополнительно отмечено взаимодействие между атомом серы лиганда и остатком PHE457 на расстоянии 4,23 Å.

Наибольшее число связей образовано с остатками PHE457 и TYR523 (по 2 контакта каждый). Особое значение имеет контакт с HIS383, так как данный остаток непосредственно координирует каталитический ион цинка, что указывает на влияние лиганда на металлозависимый каталитический механизм фермента. Визуализация взаимодействия представлена на рис. 2.

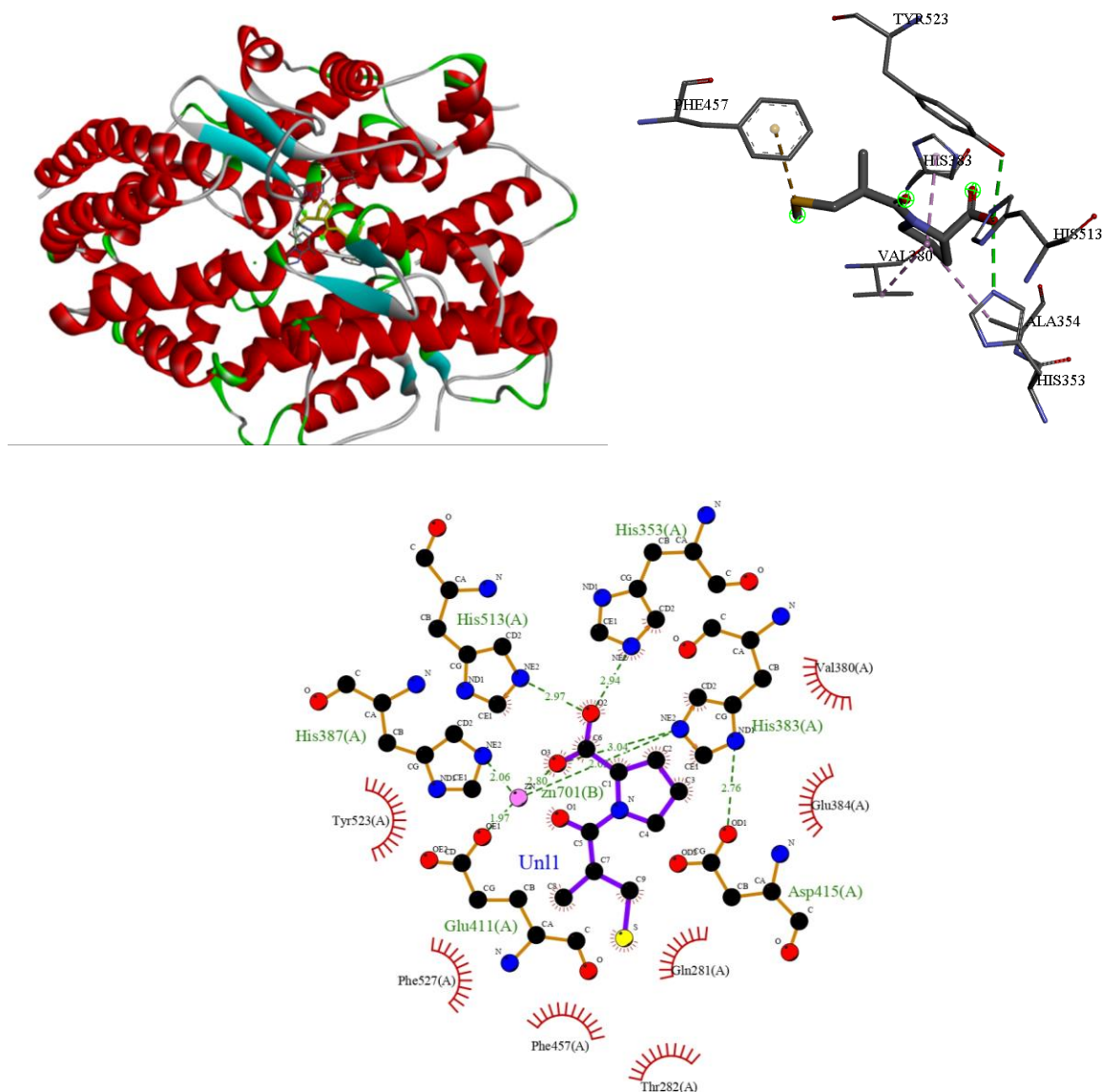
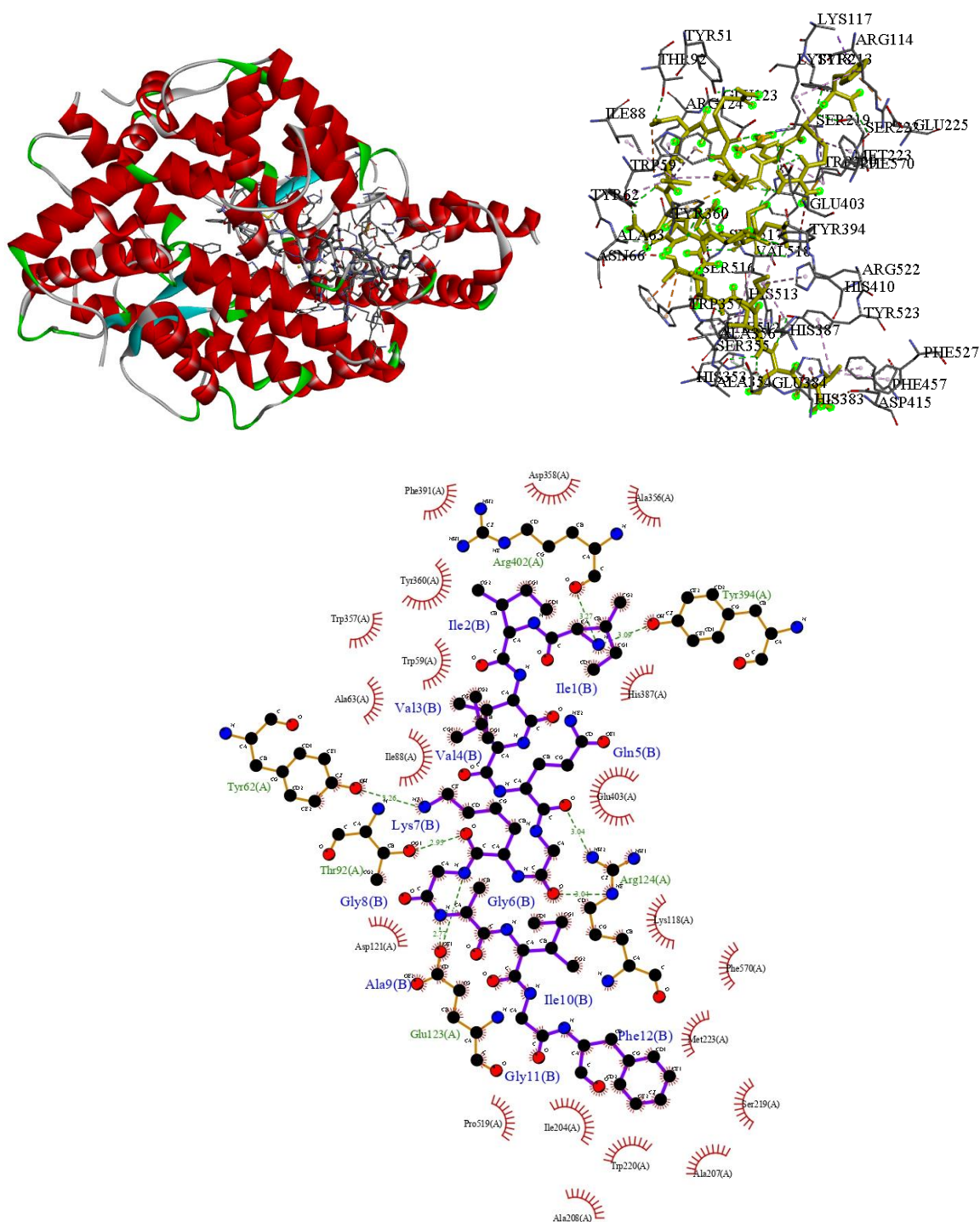


Рис. 2. Молекулярное взаимодействие АПФ и каптоприла
Fig. 2. Molecular interaction of ACE with captopril

Взаимодействие IIIVQGKGAIGF с АПФ

При связывании лиганда IIIVQGKGAIGF с АПФ выявлено 30 межмолекулярных взаимодействий: 14 водородных связей и 16 гидрофобных контактов.

Водородные связи с остатками активного центра и около него образованы с участием атомов GLU123 (5 контактов на расстояниях 1,84–2,88 Å), TYR360 (2 контакта, 2,29–2,98 Å), ARG124 (2 контакта, 3,04 Å), ASP121 (2,42 Å), THR92 (2,95 Å), TRP220 (3,16 Å), TYR394 (2,62 Å) и TYR62 (3,05 Å). При этом контакт ALA9–GLU123 (1,84 Å) является наиболее коротким и потенциально наиболее прочным водородным взаимодействием. Гидрофобные контакты обнаружены с остатками TRP59 (2 контакта, 4,21–4,40 Å), TYR360 (3 контакта, 4,67–5,24 Å), TYR62 (5,20 Å), TRP357 (5,04 Å), ALA63 (4,29 Å), MET223 (4,78 Å), ARG402 (5,30 Å), ILE88 (3,88 Å), PHE570 (5,09 Å), ILE204 (4,76 Å), ALA207 (4,61 Å) и ALA208 (5,14 Å). Гидрофобный контакт с HIS387 (5,17 Å) заслуживает особого внимания, так как этот остаток входит в цинк-связывающий мотив АПФ.



Взаимодействие VIPPGVPYWTYNT с АПФ

Атомы остатков ASP358, TYR523, HIS410, HIS387, TYR360, SER355, SER516, TYR62, ASN66, ASN70, LYS118, ARG124, TYR394, ARG522 и TRP59 образовали водородные связи с лигандом в диапазоне расстояний

2,00–3,89 Å. При этом контакт TYR11–ASP358 (2,00 Å) является наиболее коротким и потенциально наиболее прочным водородным взаимодействием. Гидрофобные взаимодействия зафиксированы с остатками TYR62 (4,69 Å), TRP357 (5,09 Å), ARG124 (2 контакта, 4,91–5,10 Å), VAL518 (4,50 Å), MET223 (5,49 Å), ILE88 (4,15 Å), TRP220 (2 контакта, 4,67–5,17 Å), ALA63 (5,29 Å), LEU139 (2 контакта, 4,72–5,10 Å) и LEU140 (2 контакта, 5,21–5,37 Å). Электростатический контакт обнаружен с остатком GLU123 (4,03 Å).

Наибольшее число контактов отмечено с остатками ARG124 (3 связи), LEU139 (2 связи), LEU140 (2 связи) и TRP220 (2 связи). При этом большое количество взаимодействий лиганда приходится на периферические остатки рецептора (TYR62, ASN66, ASN70, LYS118, TYR394, ARG522, MET223, ILE88, ALA63, LEU139, LEU140, TRP220), что указывает на фрагментарное покрытие каталитического центра и, возможно, недостаточную стабильность комплекса для эффективного ингибирования. Тем не менее с остатками активного центра TYR523, HIS410 и HIS387 были обнаружены водородные связи, что потенциально указывает на высокую вероятность ингибирования активности АПФ. Визуализация представлена на рис. 4.

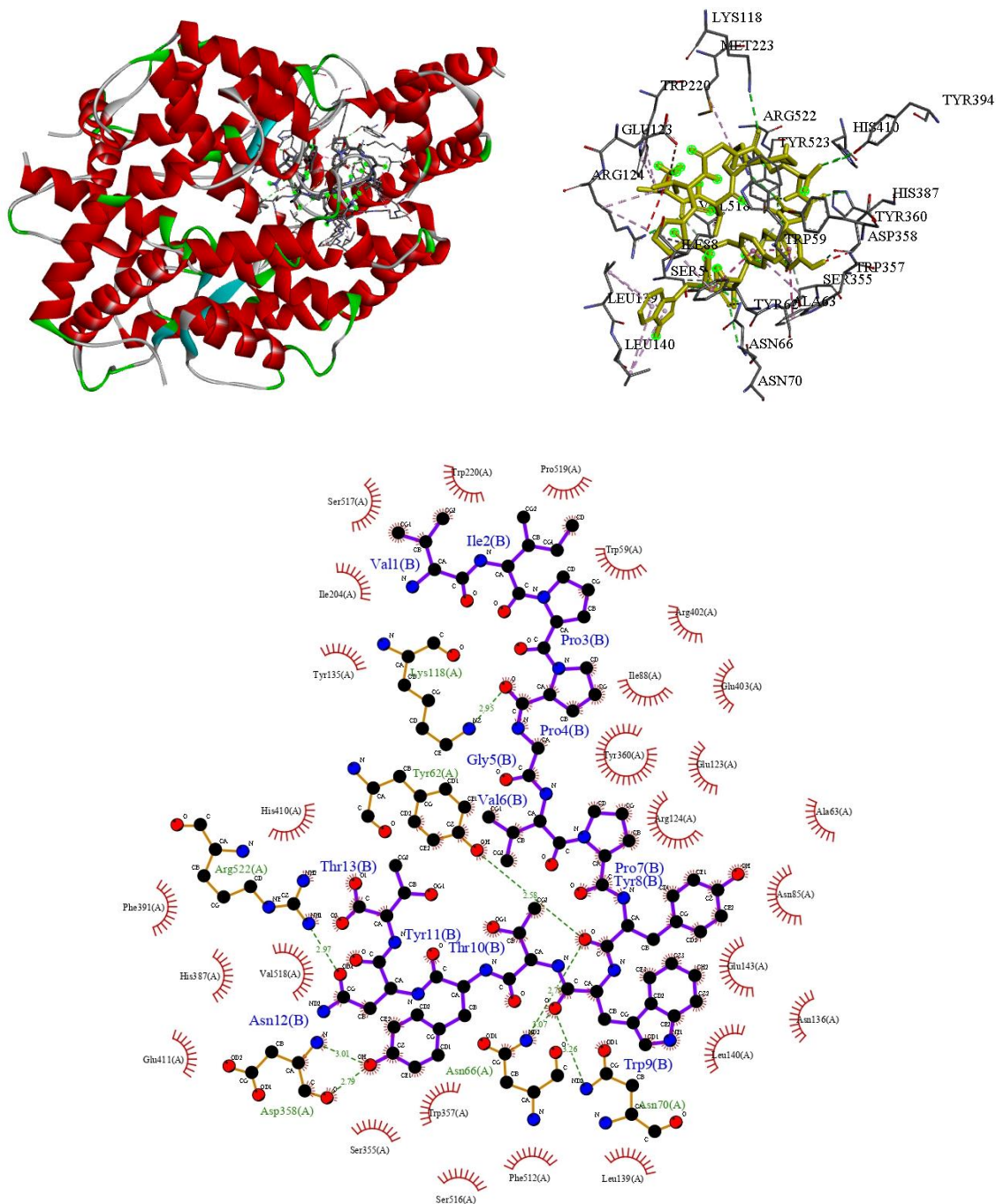


Рис. 4. Молекулярное взаимодействие АПФ и пептида VIPPGVPYWTYNT
Fig. 4. Molecular interaction of ACE with peptide VIPPGVPYWTYNT

Анализ межмолекулярных связей с ДПП-4

В ходе работы были изучены и проанализированы межмолекулярные взаимодействия между исследуемыми пептидами и ситаглиптином с молекулой ДПП-4. В табл. 3 представлена общая характеристика связей и, в частности, связи с активным центром белка-рецептора.

Таблица 3. Характеристики связывания лигандов с ДПП-4
Table 3. Binding characteristics of ligands with DPP-4

Лиганд	Всего связей	Связи с ДПП-4	Диапазон расстояний (Å)
Ситаглиптин	20	GLU205 (1 электростатическое взаимодействие) ARG125 (1 водородная связь, 1 галогенная связь) TRP629 (1 водородная связь, 5 гидрофобных взаимодействий) HIS740 (1 водородная связь, 1 галогенная связь) GLY741 (1 водородная связь) SER630 (2 водородные связи) TYR547 (2 водородные связи) ASN710 (1 галогенная связь) TYR662 (1 водородная связь, 1 гидрофобное взаимодействие) TYR666 (1 гидрофобное взаимодействие)	2,74–5,35
IIIVVQGKGAIGF	29	GLU738 (1 комбинированное взаимодействие) ASP243 (1 электростатическое взаимодействие) SER744 (1 водородная связь) TYR238 (1 водородная связь) ALA707 (1 водородная связь) ASP709 (1 водородная связь) SER242 (2 водородные связи) GLN123 (2 водородные связи) TRP124 (1 водородная связь, 2 гидрофобных взаимодействия) TYR195 (1 водородная связь, 1 гидрофобное взаимодействие) ASP192 (1 водородная связь) ASN170 (1 водородная связь) TYR211 (1 водородная связь) LYS122 (1 водородная связь) GLN153 (1 водородная связь) VAL121 (1 гидрофобное взаимодействие) LYS250 (1 гидрофобное взаимодействие) ALA743 (1 гидрофобное взаимодействие) VAL252 (1 гидрофобное взаимодействие) VAL254 (1 гидрофобное взаимодействие) PHE240 (1 гидрофобное взаимодействие)	2,18–5,98
VIPPGVPYWTYNT	20	ASP739 (2 водородные связи, 1 электростатическое взаимодействие) GLN123 (2 водородные связи) TYR211 (2 водородные связи) GLY741 (1 водородная связь) ALA743 (1 водородная связь) ASN170 (1 водородная связь) ASP243 (2 электростатических взаимодействия) PHE240 (2 гидрофобных взаимодействия) VAL121 (1 гидрофобное взаимодействие) LYS250 (1 гидрофобное взаимодействие) VAL252 (1 гидрофобное взаимодействие) TRP124 (1 гидрофобное взаимодействие) TYR195 (1 гидрофобное взаимодействие) ALA707 (1 гидрофобное взаимодействие)	1,76–5,41

Взаимодействие ситаглиптина с ДПП-4

При докинге ситаглиптина с рецептором ДПП-4 было обнаружено 20 межмолекулярных взаимодействий: 9 водородных связей, 7 гидрофобных контактов, 3 галогенных контакта (с участием атомов фтора), а также одно электростатическое взаимодействие. Многие выявленные контакты приходятся на аминокислотные остатки активного центра, что подтверждает высокую селективность связывания данного лиганда.

В образовании водородных связей участвовали атомы остатков TRP629, HIS740, GLY741, SER630 и TYR547 в диапазоне расстояний 3,30–4,18 Å, при этом наиболее прочные контакты (< 3,50 Å) зафиксированы с TRP629 (3,30 Å), TYR662 (3,31 Å) и SER630 (3,34 Å). Галогенные взаимодействия обнаружены с атомами ASN710 (2,88 Å), HIS740 (3,51 Å) и ARG125 (3,42 Å). Гидрофобные контакты образованы с остатками TRP629, TYR662 и TYR666 в диапазоне расстояний 3,91–5,23 Å.

Наибольшее количество связей образовано с остатком TRP629 (5 контактов), входящим в карман S1. Особое значение имеют контакты с каталитической триадой: HIS740 и SER630. Взаимодействие с ARG125 также вносит вклад в стабилизацию лиганда в кармане S2. Визуализация представлена на рис. 5.

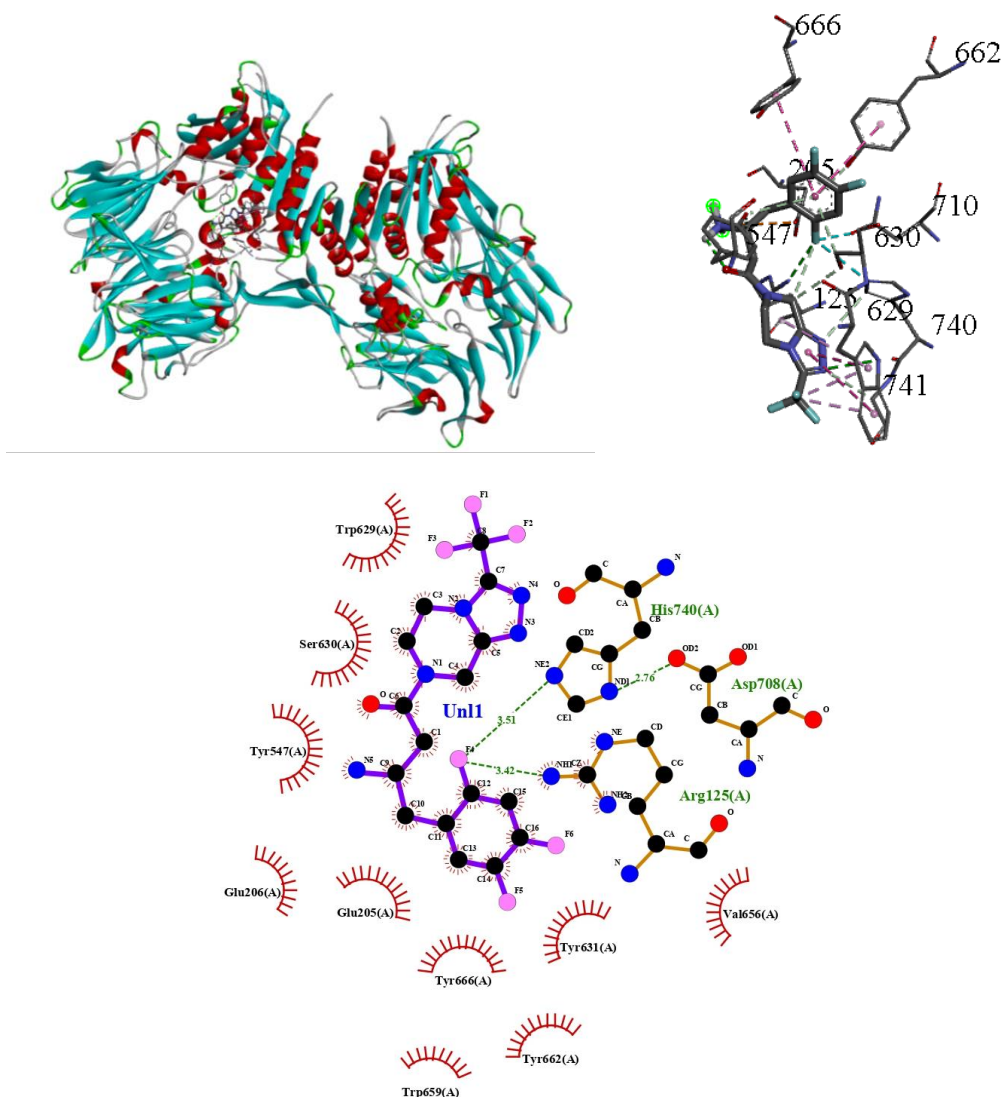


Рис. 5. Моделирование взаимодействия ДПП-4 и ситаглиптина
Fig. 5. Modeling of DPP-4 interaction with sitagliptin

Взаимодействие IIVVQGKGAIGF с ДПП-4

При связывании лиганда IIVVQGKGAIGF с ДПП-4 выявлено 29 межмолекулярных взаимодействий: 15 водородных связей, 11 гидрофобных контактов, 2 электростатических взаимодействия и 1 комбинированный контакт (водородная связь + электростатическое взаимодействие).

Водородные связи образованы с участием атомов остатков GLU738 (2,33 Å), SER744 (2,93 Å), TYR238 (2,47 Å), ALA707 (2,64 Å), ASP709 (2,18 Å), SER242 (2 контакта, 2,37–2,61 Å), GLN123 (2 контакта,

3,03–3,92 Å), TRP124 (3,66 Å), TYR195 (3,83 Å), ASP192 (2,92 Å), ASN170 (3,13 Å), TYR211 (2,89 Å), LYS122 (3,03 Å) и GLN153 (3,17 Å). При этом контакт GLN5–ASP709 (2,18 Å) является наиболее коротким водородным взаимодействием. Электростатические взаимодействия зафиксированы с остатками ASP243 (5,07 Å) и ASP725 (4,81 Å). Гидрофобные контакты обнаружены с остатками TRP124 (2 контакта, 4,78–5,98 Å), TYR195 (4,86 Å), VAL121 (5,42 Å), LYS250 (5,38 Å), ALA743 (4,85 Å), VAL252 (5,04 Å), VAL254 (4,76 Å) и PHE240 (5,23 Å).

Наибольшее число взаимодействий отмечено с остатками TRP124 (3 связи), GLN123 (2 связи), SER242 (2 связи) и TYR195 (2 связи). Селективность к активному центру у IIVVQGKGAIGF была ниже, чем у ситаглиптина, однако многие контакты были в непосредственной близости к активному центру, хотя и не напрямую с описанными в литературе аминокислотами из активного центра ДПП-4. Визуализация представлена на рис. 6.

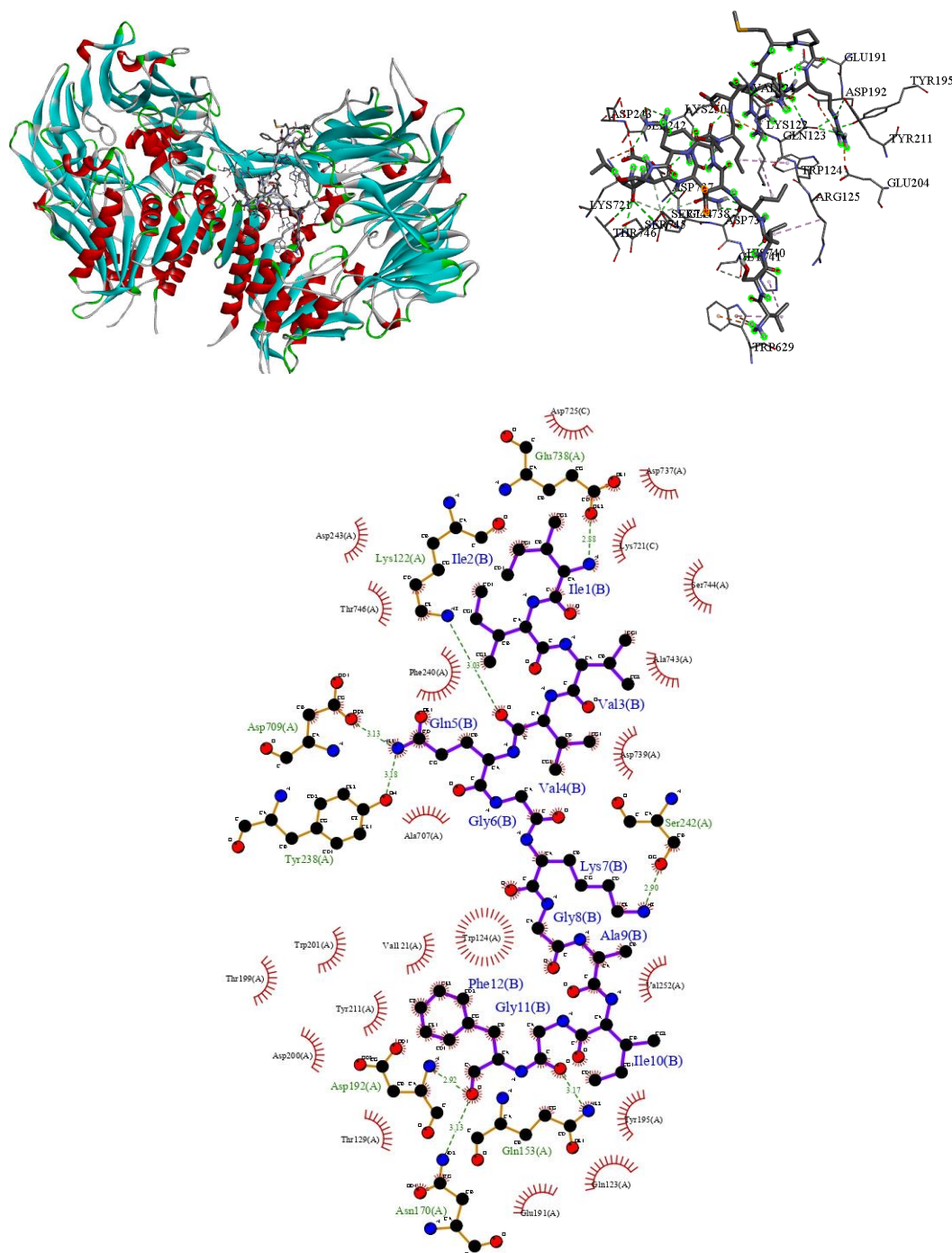


Рис. 6. Молекулярное взаимодействие ДПП-4 и пептида IIVVQGKGAIGF
Fig. 6. Molecular interaction of DPP-4 with peptide IIVVQGKGAIGF

Взаимодействие VIPPGVPYWTYNT с ДПП-4

Для лиганда VIPPGVPYWTYNT при докинге с ДПП-4 обнаружено 20 межмолекулярных взаимодействий: 9 водородных связей, 8 гидрофобных контактов и 3 электростатических взаимодействия.

Водородные связи образованы с участием атомов остатков ASP739 (2 контакта, 1,76–2,69 Å), GLN123 (2 контакта, 2,66–3,05 Å), TYR211 (2 контакта, 1,80–2,87 Å), GLY741 (3,34 Å), ALA743 (3,35 Å) и ASN170 (3,72 Å). При этом контакт THR13–ASP739 (1,76 Å) является наиболее коротким и потенциально наиболее прочным водородным взаимодействием среди всех проанализированных лигандов. Электростатические взаимодействия зафиксированы с остатками ASP243 (2 контакта с TRP9, 4,16–4,37 Å) и ASP739 (4,09 Å). Гидрофобные контакты обнаружены с остатками PHE240 (2 контакта, 4,46–5,10 Å), VAL121 (5,23 Å), LYS250 (4,15 Å), VAL252 (4,81 Å), TRP124 (5,30 Å), TYR195 (5,13 Å) и ALA707 (4,69 Å).

Наибольшее число контактов отмечено с остатком ASP739 (3 взаимодействия), который расположен в непосредственной близости от каталитического гистидина HIS740. VIPPGVPYWTYNT так же, как и PIVVQGKAIGF, был менее селективен к активному центру, чем ситаглиптин. Визуализация представлена на рис. 7.

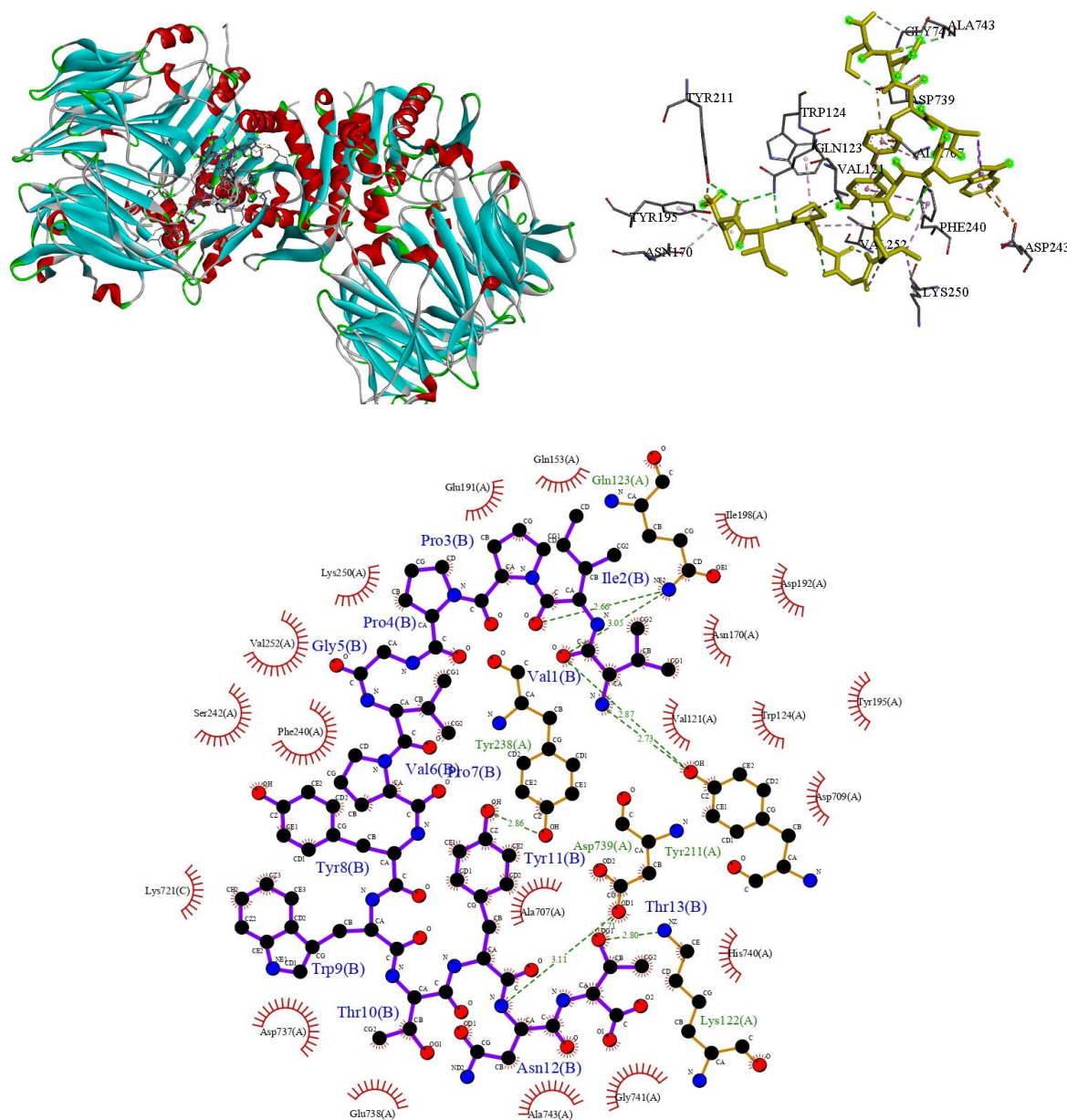


Рис. 7. Молекулярное взаимодействие ДПП-4 и пептида VIPPGVPYWTYNT
Fig. 7. Molecular interaction of DPP-4 with peptide VIPPGVPYWTYNT

Выводы

В ходе исследования с помощью методов молекулярного моделирования была оценена способность двух биологически активных пептидов соевого происхождения IIVVQGKGAIGF и VIPPGVPYWTYNT ингибировать АПФ и ДПП-4. Оба пептида продемонстрировали высокую аффинность к исследуемым рецепторам. В отношении АПФ пептиды IIVVQGKGAIGF ($-9,07 \pm 0,37$ ккал/моль) и VIPPGVPYWTYNT ($-10,46 \pm 0,30$ ккал/моль) показали статистически значимо более сильное связывание по сравнению с референсным ингибитором каптоприлом ($-5,40 \pm 0,21$ ккал/моль; $p < 0,001$). В случае ДПП-4 пептид VIPPGVPYWTYNT ($-8,56 \pm 0,25$ ккал/моль) превзошел по аффинности ситаглиптин ($-7,86 \pm 0,17$ ккал/моль; $p < 0,001$), тогда как IIVVQGKGAIGF ($-6,90 \pm 0,14$ ккал/моль) уступал этому веществу.

Анализ химических связей показал, что референсные препараты (каптоприл, ситаглиптин) демонстрировали высокую селективность, а большинство предсказанных контактов приходилось на остатки активного центра. Пептиды формировали большее общее число взаимодействий, однако лишь часть из них локализовались в каталитической зоне. Это указывает на то, что пептиды, обладая высокой общей аффинностью, вероятно, ингибируют активный центр хуже, чем эталонные препараты. Оба пептида формировали связи с различными остатками активных участков АПФ: TYR523, HIS410 и HIS387. Для взаимодействия с ДПП-4 не было обнаружено прямых контактов с описанными в литературе каталитическими участками, но были обнаружены контакты с рядом аминокислот в непосредственной близости к ним. Таким образом, оба пептида являются перспективными ингибиторами АПФ и ДПП-4. Это подтверждает перспективность их дальнейшего изучения в качестве функциональных ингредиентов в пищевых продуктах, а также их компонентов (в составе гидролизатов).

Следует отметить, что количество выявленных межмолекулярных взаимодействий, визуализированных с помощью LigPlot+, может отличаться от данных, полученных в Discovery Studio Visualizer. Это связано с тем, что LigPlot+ использует более строгие геометрические критерии детекции связей. В данной работе количественный анализ и классификация межмолекулярных связей проводились на основе данных Discovery Studio Visualizer, обеспечивающих более полную характеристику взаимодействий, а LigPlot+ использовался для общей визуализации.

Несмотря на благоприятные результаты, *in silico* интерпретация требует учета допущений метода: использование статичных кристаллических структур, упрощенное моделирование пептидов, отсутствие учета растворителя и динамики белка, конкуренции с точки зрения прочих субстратов. Полученные данные указывают на высокий потенциал пептидов, особенно VIPPGVPYWTYNT, в качестве перспективного натурального ингибитора АПФ и ДПП-4. Однако для подтверждения ингибирующей активности и оценки селективности необходим синтез пептидов и дальнейшие исследования *in vitro* и *in vivo*.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

- Akbarian, M., Khani, A., Eghbalpour, S., Uversky, V. N. et al. 2022. Bioactive peptides: Synthesis, sources, applications, and proposed mechanisms of action. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3). Article number: 1445. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23031445>.
- Chhabria, S., Mathur, S., Vadakan, S., Sahoo, D. K. et al. 2022. A review on phytochemical and pharmacological facets of tropical ethnomedicinal plants as reformed DPP-IV inhibitors to regulate incretin activity. *Frontiers in Endocrinology*, 13. Article number: 1027237. DOI: <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.1027237>.
- Cutrell, S., Alhomoud, I. S., Mehta, A., Talasaz, A. H. et al. 2023. ACE-Inhibitors in hypertension: A historical perspective and current insights. *Current Hypertension Reports*, 25, pp. 243–250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11906-023-01248-2>.
- Du, Z., Comer, J., Li, Y. 2023. Bioinformatics approaches to discovering food-derived bioactive peptides: Reviews and perspectives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 162. Article number: 117051. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117051>.
- Fan, H., Liu, H., Zhang, Y., Zhang, S. et al. 2022. Review on plant-derived bioactive peptides: Biological activities, mechanism of action and utilizations in food development. *Journal of Future Foods*, 2(2), pp. 143–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.03.003>.
- Fang, Z., Zhang, M., Lian, J., Xiao, Y. et al. 2025. Uncovering novel DPP-IV inhibitory peptides from amphibian (*Lithobates catesbeiana*) skin via peptidomics and molecular simulation. *Foods*, 14(17). Article number: 3023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14173023>.
- Fomenko, V. V., Detinkin, I. A., Chernukha, I. M., Mashentseva, N. G. et al. 2026. Study of soy protein proteolysis by digestive enzymes and description of the peptide profile of the resulting hydrolysates. *Problems of Nutrition*, 95(2(564)), pp. 70–91. (In Russ.) = Фоменко В. В., Детинкин И. А., Чернуха И. М., Машенцева Н. Г. [и др.]. Изучение протеолиза соевого белка пищеварительными ферментами и описание пептидного профиля полученных гидролизатов // Вопросы питания. 2026. Т. 95, № 2(564). С. 70–91. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2026-95-2-70-91>. EDN: LCTYQG.

- Guha, S., Sharma, H., Deshwal, G. K., Rao, P. S. 2021. A comprehensive review on bioactive peptides derived from milk and milk products of minor dairy species. *Food Production, Processing and Nutrition*, 3. Article number: 2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43014-020-00045-7>.
- Guo, S., Feng, R., Li, Y., Gong, Y. et al. 2026. A comprehensive review of shellfish peptides: Extraction, characterization, biological activity, and commercial potential. *Journal of Functional Foods*, 140. Article number: 107252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2026.107252>.
- Jo, D.-M., Khan, F., Park, S.-K., Ko, S.-C. et al. 2024. From sea to lab: Angiotensin I – converting enzyme inhibition by marine peptides – Mechanisms and applications. *Marine Drugs*, 22(10). Article number: 449. DOI: <https://doi.org/10.3390/md22100449>.
- Khamanga, S. M., Walker, R. B. 2011. The use of experimental design in the development of an HPLC–ECD method for the analysis of captopril. *Talanta*, 83(3), pp. 1037–1049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.11.025>.
- Liu, W., Chen, X., Li, H., Zhang, J. et al. 2022. Anti-inflammatory function of plant-derived bioactive peptides: A review. *Foods*, 11(15). Article number: 2361. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11152361>.
- Lorenzo, J. M., Munekata, P. E. S., Gómez, B., Barba, F. J. et al. 2018. Bioactive peptides as natural antioxidants in food products – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 79, pp. 136–147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.003>.
- Mathur, V., Alam, O., Siddiqui, N., Jha, M. et al. 2023. Insight into structure activity relationship of DPP-4 inhibitors for development of antidiabetic agents. *Molecules*, 28(15). Article number: 5860. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28155860>.
- Montesano, D., Gallo, M., Blasi, F., Cossignani, L. 2020. Biopeptides from vegetable proteins: New scientific evidences. *Current Opinion in Food Science*, 31, pp. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.10.008>.
- Nasri, R., Abdelhedi, O., Nasri, M., Jridi, M. 2022. Fermented protein hydrolysates: Biological activities and applications. *Current Opinion in Food Science*, 43, pp. 120–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.11.006>.
- Ovchinnikova, T. V. 2021. Marine peptides: Structure, bioactivities, and a new hope for therapeutic application. *Marine Drugs*, 19(8). Article number: 407. DOI: <https://doi.org/10.3390/md19080407>.
- Peighambaroust, S. H., Karami, Z., Pateiro, M., Lorenzo, J. M. 2021. A review on health-promoting, biological, and functional aspects of bioactive peptides in food applications. *Biomolecules*, 11(5). Article number: 631. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom11050631>.
- Petrov, V., Aleksandrova, T., Pashev, A. 2025. Synthetic approaches to novel DPP-IV inhibitors – A literature review. *Molecules*, 30(5). Article number: 1043. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules30051043>.
- Shao, B., Huang, X., Xu, M., Cheng, D. et al. 2023. Peptides isolated from black soybean synergistically inhibit the activity of angiotensin converting enzyme (ACE). *Journal of Functional Foods*, 106. Article number: 105604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105604>.
- Sotoudeheian, M., Mirahmadi, S. M. S., Darjani, P. S., Moradi, M. et al. 2025. Sitagliptin, diabetes mellitus, and heart failure: An in-depth review of sitagliptin therapy and heart failure in patients with diabetes mellitus. *Diabetology International*, 16, pp. 237–256. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13340-025-00800-6>.
- Stoiljkovic, M., Jakovljevic, V., Milosavljevic, J., Bolevich, S. et al. 2025. Cardioprotective role of captopril: From basic to applied investigations. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(15). Article number: 7215. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26157215>.
- Tornesello, A. L., Borrelli, A., Buonaguro, L., Buonaguro, F. M. et al. 2020. Antimicrobial peptides as anticancer agents: Functional properties and biological activities. *Molecules*, 25(12). Article number: 2850. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25122850>.
- Wang, J., Liu, J., John, A., Jiang, Y. et al. 2022a. Structure identification of walnut peptides and evaluation of cellular antioxidant activity. *Food Chemistry*, 388. Article number: 132943 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132943>.
- Wang, S., Zhao, M., Fan, H., Wu, J. 2022b. Emerging proteins as precursors of bioactive peptides/hydrolysates with health benefits. *Current Opinion in Food Science*, 48. Article number: 100914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100914>.
- Wu, F., Luo, X., Zhang, Y., Wang, P. et al. 2023. Purification, identification, and inhibitory mechanisms of a novel ACE inhibitory peptide from *Torreya grandis*. *Nutrients*, 15(10). Article number: 2374. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15102374>.
- Zambrowicz, A., Timmer, M., Polanowski, A., Lubec, G. et al. 2013. Manufacturing of peptides exhibiting biological activity. *Amino Acids*, 44, pp. 315–320. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00726-012-1379-7>.
- Zhang, L., Bai, Y.-Y., Hong, Z.-S., Xie, J. et al. 2023. Isolation, identification, activity evaluation, and mechanism of action of neuroprotective peptides from walnuts: A review. *Nutrients*, 15(18). Article number: 4085. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15184085>.
- Zhao, R., Zhou, Y., Shen, H., Guan, L. et al. 2025. Preparation and encapsulation of DPP-IV inhibitory peptides: Challenges and strategies for functional food development. *Foods*, 14(9). Article number: 1479. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14091479>.

Zheng, W., Tian, E., Liu, Z., Zhou, C. et al. 2022a. Small molecule angiotensin converting enzyme inhibitors: A medicinal chemistry perspective. *Frontiers in Pharmacology*, 13. Article number: 968104. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.968104>.

Zheng, S.-L., Luo, Q.-B., Suo, S.-K., Zhao, Y.-Q. et al. 2022b. Preparation, identification, molecular docking study and protective function on HUVECs of novel ACE inhibitory peptides from protein hydrolysate of skipjack tuna muscle. *Marine Drugs*, 20(3). Article number: 176. DOI: <https://doi.org/10.3390/md20030176>.

Сведения об авторах

Фоменко Виктория Валерьевна – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), аспирант;
e-mail: Victoria-96@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8677-0927>

Victoria V. Fomenko – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
State University ROSBIOTECH, PhD Student;
e-mail: Victoria-96@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8677-0927>

Большев Николай Алексеевич – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), магистрант;
e-mail: nickolai.bolshev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3781-4410>

Nikolaj A. Bolshev – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
State University ROSBIOTECH, Master Student;
e-mail: nickolai.bolshev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3781-4410>

Машенцева Наталья Геннадьевна – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), д-р техн. наук, профессор РАН;
e-mail: natali-mng@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9287-0585>

Natalia G. Mashentseva – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
State University ROSBIOTECH, Dr Sci. (Engineering), Professor of RAS;
e-mail: natali-mng@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9287-0585>

Детинкин Илья Александрович – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), магистрант;
e-mail: detinkin02@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0985-9505>

Илья А. Detinkin – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
State University ROSBIOTECH, Master Student;
e-mail: detinkin02@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0985-9505>

Алексаночкин Денис Игоревич – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), аспирант;
e-mail: aleksanochkindi@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7677-6583>

Denis I. Aleksanochkin – 11 Volokolamsk Highway, Moscow, Russia, 125080;
State University ROSBIOTECH, PhD Student;
e-mail: aleksanochkindi@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7677-6583>

УДК 663.15

Влияние источника углерода и условий культивирования на синтез ксантана бактериями *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 и его свойства

Т. А. Ямашев*, И. А. Хусаинов, И. В. Кручина-Богданов,
И. А. Наумов, А. В. Канарский

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: yamashev555@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-7924>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
30.04.2026;

получена
после доработки
25.06.2026;

принята
к публикации
01.07.2026

Ключевые слова:
ксантановая камедь,
сахароза,
глюкоза,
меласса,
гидролизат пшеницы

В процессе биосинтеза ксантановой камеди использовались штамм бактерий *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720, сахароза и глюкоза, содержащиеся в мелассе и гидролизате пшеницы соответственно. Культивирование осуществляли в колбах в шейкере-инкубаторе и на установке с принудительной аэрацией. В процессе культивирования измеряли потребление углеводов, количество образующегося ксантана, pH и вязкость культуральной жидкости. При культивировании на среде, содержащей глюкозу в качестве основного источника углерода, образовалось больше ксантана; вязкость культуральной жидкости была выше, чем при культивировании на средах, содержащих сахарозу. Экономический коэффициент при культивировании на средах, содержащих глюкозу, составил 0,24 (в колбах) и 0,40 (на установке с принудительной аэрацией), на средах на основе сахарозы – 0,18 и 0,28 соответственно. При исследовании определена конечная вязкость сред на основе глюкозы [14,6 (в колбах) и 45,2 мПа·с (на установке с принудительной аэрацией)] и сахарозы (7,25 и 37,4 мПа·с соответственно). Питательные среды на основе мелассы и гидролизата пшеницы в первые двое суток оставались нейтральными, на третьи сутки среда с мелассой закислялась, с гидролизатом пшеницы – защелачивалась, на четвертые сутки значение pH среды с мелассой стало щелочным (вследствие отмирания клеток и автолиза). Ксантан, полученный на мелассе, имел более темную окраску по сравнению с ксантаном, полученным на гидролизате пшеницы. Углеводный состав ксантана, определенный методом газовой хроматографии, аналогичен составу коммерческого продукта. Вязкость 1%-го раствора ксантана, полученного в лаборатории, в три раза ниже вязкости коммерческого образца. Лабораторный ксантан содержал больше примесей, о чем свидетельствовали его высокая зольность и результаты элементного анализа, полученные методом сканирующей электронной микроскопии.

Для цитирования

Ямашев Т. А. и др. Влияние источника углерода и условий культивирования на синтез ксантана бактериями *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 и его свойства. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 377–392. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-377-392>.

The influence of carbon source and cultivation conditions on the synthesis of xanthan gum by *Xanthomonas campestris* bacteria VKPM B-6720 and its properties

Timur A. Yamashev*, Innazar A. Khusainov, Igor V. Kruchina-Bogdanov,
Igor A. Naumov, Albert V. Kanarsky

*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;
e-mail: yamashev555@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-7924>

Article info

Received
30.04.2026;

received
in revised form
25.06.2026;

accepted
01.07.2026

Key words:

xanthan gum,
sucrose,
glucose,
molasses,
wheat hydrolysate

Abstract

Xanthan gum biosynthesis has been performed using the *Xanthomonas campestris* bacterial strain VKPM B-6720, sucrose, and glucose contained in molasses and wheat hydrolysate respectively. Cultivation has been carried out in flasks in a shaker incubator and in a forced-air aeration system. Carbohydrate consumption, the amount of xanthan formed, pH, and viscosity of the culture fluid have been measured during the cultivation. More xanthan is formed during cultivation in a medium containing glucose as the main carbon source; the viscosity of the culture fluid is higher than during cultivation in media containing sucrose. The economic coefficient for cultivation in glucose-containing media is 0.24 (in flasks) and 0.40 (in a forced-air aeration system), while for sucrose-based media it is 0.18 and 0.28, respectively. The study has determined the final viscosity of glucose-based media [14.6 (in flasks) and 45.2 mPa·s (in a forced-air aeration unit)] and sucrose-based media (7.25 and 37.4 mPa·s, respectively). Culture media based on molasses and wheat hydrolysate remained neutral during the first two days. On the third day, the molasses-based media became acidic, while the wheat hydrolysate-based media became alkaline. On the fourth day, the pH of the molasses-based media became alkaline (due to cell death and autolysis). Xanthan gum obtained from molasses is darker in color than that obtained from wheat hydrolysate. The carbohydrate composition of xanthan gum determined by gas chromatography is similar to that of the commercial product. The viscosity of 1 % xanthan gum solution obtained in the laboratory is three times lower than that of the commercial sample. Laboratory xanthan gum contains more impurities as evidenced by its high ash content and the results of elemental analysis obtained by scanning electron microscopy.

For citation

Yamashev, T. A. et al. 2026. The influence of carbon source and cultivation conditions on the synthesis of xanthan gum by *Xanthomonas campestris* bacteria VKPM B-6720 and its properties. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 377–392. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-377-392>.

Введение

Ксантановая камедь представляет собой высокомолекулярный разветвленный анионный гетерополисахарид с брутто-формулой $(C_{35}H_{49}O_{29})_n$ и молекулярной массой от $2 \cdot 10^6$ до $20 \cdot 10^6$ Да (Song et al., 2015). Основная цепь ксантановой камеди состоит из остатков β -D-глюкопиранозы, связанных между собой β -(1 $\rightarrow$ 4)-гликозидными связями; ответвлениями являются трисахариды с последовательностью в порядке удаления от основной цепи: β -D-манноза, β -D-глюкуроновая кислота и α -D-манноза (Layek, 2024). Часть гидроксильных групп боковой цепи замещена на ацетильные и пируватные группы (Layek, 2024). Как правило, ацетиленоано до 90 % маннозы, находящейся ближе к основной цепи ксантана, а к 30–50 % терминальной маннозы кетальной (ацетальной) связью в положениях C-4 и C-6 присоединены остатки пировиноградной кислоты, но могут быть и другие сочетания (Wu et al., 2019). Так, в одной молекуле ксантана встречаются до шести вариантов структуры боковой цепи, в которых оба остатка маннозы могут быть свободными, или наоборот – оба замещенными, или только один остаток маннозы связан с уксусной или пировиноградной кислотой в различных сочетаниях (Kool et al., 2013). С увеличением количества остатков пировиноградной кислоты в молекуле ксантана увеличивается и его вязкость (Flores Candia et al., 1999; Wu et al., 2019).

Ксантановую камедь получают с помощью бактерий *Xanthomonas campestris* аэробной ферментацией на питательных средах, содержащих источники усваиваемых углеводов и азота. В процессе ферментации ксантановая камедь выделяется бактериями в среду культивирования. По окончании ферментации среду пастеризуют, осаждают ксантановую камедь этиловым или изопропиловым спиртом, полученный осадок отделяют фильтрацией или центрифугированием и высушивают¹ (Rosalam et al., 2006; Palaniraj et al., 2011; Bajić et al., 2017).

Ксантановая камедь хорошо растворяется в воде при любой температуре и даже в незначительных концентрациях ($\approx 1,0$ %) заметно повышает вязкость жидкости, в связи с чем она используется в качестве загустителя, гелеобразователя и стабилизатора в пищевой (Rashidi et al., 2023), косметической (Furtado et al., 2022), текстильной (Cao et al., 2019), нефтедобывающей отраслях промышленности (Магадова и др., 2023; Абаас и др., 2013), при производстве стройматериалов для загущения и структурообразования строительных смесей (Masoumi et al., 2023), в медицине для контролируемого высвобождения лекарственных препаратов (Cortes et al., 2020; Layek, 2024), в сельском хозяйстве для повышения влагоудерживающих свойств почвы (Palaniraj et al., 2011; Berninger et al., 2021), а также для повышения прочности песчаных и глинистых грунтов и замедления эрозии почв (Аржакова и др., 2022; Kwon et al., 2023; Kumar et al., 2024). Вязкость растворов ксантановой камеди мало зависит от pH и ионной силы раствора (Rosalam et al., 2006). Для растворов ксантановой камеди характерна псевдопластичность, т. е. они становятся менее вязкими при увеличении сдвигового воздействия, что облегчает их перекачивание, и снова густеют при переходе в состояние покоя (García-Ochoa et al., 2000).

Производство ксантановой камеди, основанное на культивировании бактерий *X. campestris* на синтетических питательных средах, является дорогостоящим, поэтому мировым трендом в исследованиях, посвященных получению ксантана, является изучение возможности использования питательных сред, приготовленных из вторичных ресурсов, образующихся при переработке сельскохозяйственного сырья (Palaniraj et al., 2011; Rashidi et al., 2023). В качестве источников углерода для биосинтеза ксантана предлагалось использование свежковичной мелассы (Moosavi et al., 2010; Богатырева и др., 2016) и мелассы из сахарного тростника (Abd El-Salam et al., 1994), крахмала (Krishna Leela et al., 2000), гидролизатов крахмала (Niknezhad et al., 2014), гидролизата жмыха маниоки (Woiciechowski et al., 2004; Sujithra et al., 2019), молочной сыворотки (Silva et al., 2009; Savvides et al., 2012), отходов сахарной свеклы (Yoo et al., 1999), отходов производства соевого молока (Acace и др., 2024), сточных вод кондитерских производств (Bajić et al., 2017), панцирей ракообразных (de Sousa Costa et al., 2014), гидролизатов древесины (Илаова и др., 2024; Способ получения..., 2025), кокосовой скорлупы и шелухи какао (da Silva et al., 2018).

На биосинтез ксантана существенное влияние оказывает также источник азота; его вносят в органической и неорганической форме (Хисаметдинов и др., 2009).

Однако в рекомендациях по использованию источников углерода и азота при микробиологическом синтезе ксантана встречаются противоречия. В ряде источников утверждается, что наибольший выход ксантана наблюдается на глюкозе (Krishna Leela et al., 2000), в других – на сахарозе (Souw et al., 1979; Kumara Swamy et al., 2012). То же и с источниками азота: в публикациях содержатся указания о предпочтительном использовании азота в форме органических молекул (Ozidal et al., 2018) [дрожжевой экстракт (Kumara Swamy et al., 2012), пептон, аминокислоты, например глутаминовая кислота (Souw et al., 1979)], но также есть рекомендации по применению неорганических соединений азота [нитраты калия (Woiciechowski et al., 2004), натрия или аммония (Souw et al., 1979; Shamala et al., 2001), диаммоний фосфат (Carignatto et al., 2011), хлорид аммония (Abd El-Salam et al., 1994; Flores Candia et al., 1999), мочевины (Sujithra et al., 2019) и др.]. Частично данные противоречия могут быть связаны с культуральными различиями

¹ Ревин В. В., Лияськина Е. В. Биотехнология бактериальных экзополисахаридов. Саранск, 2019. 192 с.

штаммов бактерий, использованных в исследованиях, частично с особенностями самого процесса культивирования.

Кроме источника азота на процесс биосинтеза ксантана оказывает влияние и соотношение углерода и азота. Высокое соотношение С : N благоприятно для образования ксантана, а с повышением количества азота усиливается накопление биомассы (*García-Ochoa et al., 2000; Palaniraj et al., 2011*).

Необходимо также отметить, что многие исследования в области получения ксантана акцентированы только на выходе продукта как единственном показателе эффективности культивирования. Между тем основным технологическим параметром считается вязкость полученного продукта, так как именно способность связывать воду ксантаном, образовывать трехмерную сетку и загущать жидкости является ключевым фактором, определяющим его ценность. Для управления процессом биосинтеза ксантана важно также понимать, как меняются его показатели во времени, чтобы проводить корректирующие воздействия. Например, с увеличением вязкости культуральной жидкости ухудшается перенос кислорода к клеткам бактерий (*Bangalore et al., 2006; Seviour et al., 2011; Rashidi et al., 2023*), что может затормозить или даже полностью остановить их жизнедеятельность. Корректирующим воздействием в этом случае являются интенсификация перемешивания или усиление подачи воздуха в ферментер. При этом очевидно, что любые подобные воздействия имеют и ограничения (технические, биологические и др., требующие разрешения новых возникающих противоречий).

Целью данной работы являлось определение изменения показателей синтеза ксантана штаммом *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 в процессе культивирования в зависимости от источников углерода (свекловичная меласса или гидролизат пшеницы) и параметров технологического режима.

Материалы и методы исследования

В качестве продуцента ксантана в работе использовали штамм *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 (обозначения в других коллекциях NRRL В 1459, ATCC 13951, DSM 19000 и ВКМ В-611), полученный из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ "Курчатовский институт" (Москва).

В качестве источника углерода применяли свекловичную мелассу по ГОСТ 30561-2017² и гидролизат пшеницы.

Для приготовления гидролизата использовали мягкую яровую краснозерную пшеницу 3-го класса по ГОСТ 9353-2016³. Двухстадийный ферментативный гидролиз проводили согласно работе (*Салыхова и др., 2014*) до стабилизации содержания глюкозы.

После окончания гидролиза зерновой замес разделяли на твердую и жидкую фракции с помощью механического пресс-фильтра. Для снижения потерь глюкозы с твердой фракцией последнюю смешивали с водой при температуре 60 °С в соотношении твердой фракции к воде 1 : 0,8 и перемешивали в течение 15 мин. Промывную воду также отделяли при помощи механического пресс-фильтра и объединяли с жидкой фракцией.

Содержание сухих веществ в жидкой фракции определяли с помощью рефрактометра Atago Pal-3 (Япония), содержание глюкозы – глюкозооксидажным методом со спектрофотометрическим детектированием с использованием набора реагентов "Глюкоза Агат" (по ТУ 9398-233-11498242-01, "Агат-Мед", г. Балашиха). Содержание сахарозы в мелассе и продуктах ферментации устанавливали спектрофотометрическим методом с резорцином⁴. Значение pH определяли pH-метром-кондуктометром Extech ЕС 600 (США).

Для приготовления питательной среды гидролизат пшеницы и мелассу разбавляли водопроводной водой так, чтобы концентрация основного углевода (глюкозы и сахарозы соответственно) лежала в пределах 1,5–2,0 %. В качестве источников азота и ростовых веществ в среду добавляли пептон (по ГОСТ 13805-76⁵, НПО "Порт-Петровск", г. Курск), дрожжевой экстракт (по ТУ 9385-007-39484474-2003, ЗАО "Научно-исследовательский центр фармакотерапии", Санкт-Петербург). Составы питательных сред представлены в табл. 1. При необходимости корректировали pH среды до значения 7,0 с помощью 10%-го раствора NaOH или 5%-го раствора H₂SO₄.

Таблица 1. Состав питательных сред
Table 1. Composition of nutrient media

Среда	Начальная вязкость, мПа·с	Глюкоза, г/л	Сахароза, г/л	Пептон, г/л	Дрожжевой экстракт, г/л
– на гидролизате пшеницы	0,99 ± 0,03	16,6 ± 0,1	–	5,0	3,0
– мелассе	0,82 ± 0,03	0,2 ± 0,1	19,6 ± 0,1	5,0	3,0

² ГОСТ 30561-2017. Меласса свекловичная. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2017. 25 с.

³ ГОСТ 9353-2016. Пшеница. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2019. 16 с.

⁴ Бойко Л. М. Физико-химические методы контроля бродильных производств : справочник. Киев : Техніка, 1986. 200 с.

⁵ ГОСТ 13805-76. Пептон сухой ферментативный для бактериологических целей. Технические условия. М. : Изд-во стандартов, 1976. 7 с.

Культивирование осуществляли в колбах Эрленмейера объемом 250 мл, в которые наливали 50 мл среды, закрывали ватно-марлевыми пробками и стерилизовали при 0,5 атм в течение 20 мин. После стерилизации и охлаждения питательной среды до комнатной температуры в колбы в стерильных условиях вносили при помощи микробиологической петли посевной материал – штамм *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 [трехсуточная культура, предварительно выращенная в чашке Петри на плотной питательной среде № 353: глюкоза (1 %), пептон (0,5 %), дрожжевой экстракт (0,3 %), агар-агар (2 %)]. Для обеспечения аэрации колбы устанавливали на перемешивающее устройство с подогревом ЭКРОС ПЭ-6410М (Россия). Культивирование в колбах осуществляли в течение 72 ч при 28 °С; ставили по три колбы с каждым вариантом среды и через каждые 24 ч содержимое одной из колб использовали для определения параметров культивирования.

На следующем этапе исследований осуществляли культивирование бактерий *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 в стеклянном сосуде объемом 2 000 мл, в который наливали 500 мл среды. Сосуд со средой подвергали стерилизации при 0,5 атм в течение 30 мин, посевной материал, выращенный на двух чашках Петри, вносили указанным выше способом. Для интенсификации процесса и равномерного распределения кислорода сосуд устанавливали на перемешивающее устройство ЭКРОС ПЭ-6410М. Для обеспечения интенсивной аэрации в емкость нагнетали воздух, применяя компрессор Eheim 200 (Германия) производительностью 200 л/ч. Подаваемый воздух очищали от микроорганизмов с помощью РТФЕ-фильтра Midisart® BV 0,2 мкм Sartorius AG (Германия), который был простерилизован вместе с сосудом. Распределение воздуха в среде выполняли с помощью аквариумного аэратора. Отработанный воздух и газообразные продукты метаболизма удалялись через отдельный патрубок. Каждые 24 ч в процессе культивирования осуществляли забор проб через трубку с запорным клапаном. Для предотвращения вспенивания в среду вносили пеногаситель – 10 капель олеиновой кислоты (ГОСТ 29039-91⁶).

Вязкость культуральной жидкости и 1%-го раствора ксантана в 1%-м растворе хлорида калия устанавливали с помощью синусоидального вибровискозиметра AND Vibro Viscosimeter SV-10A (Япония) согласно методике, основанной на измерении величины электрического тока, необходимой для того, чтобы поддерживать постоянную амплитуду вибрации сенсорных пластин вискозиметра в жидкой среде.

Для определения количества ксантановой камеди отбирали аликвоту культуральной жидкости и центрифугировали при 6 600 g на центрифуге ОПН-8УХЛ (Кыргызстан) в течение 20 мин с целью отделения клеточной биомассы. Для определения количества абсолютно сухой биомассы ее навеску помещали в предварительно высушенный и взвешенный пакет из фильтровальной бумаги и высушивали при 160° в течение 3 мин между плитами контактного влагомера Кварц-21М33-1 (Россия), затем пакет охлаждали в эксикаторе в течение 20 мин и взвешивали. Ксантановую камедь переводили в нерастворимое состояние, добавляя к надосадочной жидкости 3 объемных части изопропилового спирта (ГОСТ 9805-84⁷). Выделившийся ксантан отделяли фильтрацией через нейлоновый фильтр и высушивали в сушильном шкафу при 40 °С до постоянной массы.

Влажность ксантана определяли по ГОСТ Р 57682-2017⁸, зольность – по ОФС.1.2.2.2.0013⁹.

Для установления углеводного состава образцов ксантана пробы подвергали гидролизу 2 М трифторуксусной кислотой в течение 3 ч при 121 °С. Полученные моносахариды определяли методом газовой хроматографии в виде триметилсилильных (ТМС-) производных после дериватизации (Мухометдинов и др., 2019). Условия анализа: хроматограф Shimadzu GC-2010 с автоматическим пробозадачиком АОС-20i, колонка SBP5-25 (25 м × 0,25 мм × 0,2 мкм); газ-носитель N₂, 20,0 см/с; программа температур – 1 мин при 70 °С, подъем 4 °С/мин до 320 °С, 5 мин при 320 °С; температура ввода пробы 280 °С, делитель потока 1 : 20, объем пробы 2 мкл; детектор пламенно-ионизационный, температура 325 °С.

Для исследования морфологии поверхности и элементного анализа использовали автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп Merlin компании Carl Zeiss (Германия), оснащенный детектором элементного анализа Aztec X-MAX; разрешение 127 эВ.

Полученные данные были обработаны методами статистики с использованием программного обеспечения Microsoft Excel. Результаты представлены как среднее значение и стандартное отклонение (mean ± SD).

Результаты и обсуждение

Целью первого этапа исследований было определение изменения во времени содержания усваиваемого углевода, количества образующегося ксантана и вязкости культуральной жидкости при проведении процесса в колбах.

⁶ ГОСТ 29039-91. Кислота олеиновая техническая. Приемка и методы испытаний. М. : Изд-во стандартов, 1991. 7 с.

⁷ ГОСТ 9805-84. Спирт изопропиловый. Технические условия. М. : Изд-во стандартов, 1984. 13 с.

⁸ ГОСТ Р 57682-2017. Продукция микробиологическая. Ксантан технический. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2017. 19 с.

⁹ Зола общая : общая фармакопейная статья : ОФС.1.2.2.2.0013 / Министерство здравоохранения РФ. М., 2025.

Изменение показателей культивирования на средах с гидролизатом пшеницы и мелассой представлено на рис. 1, а и б.

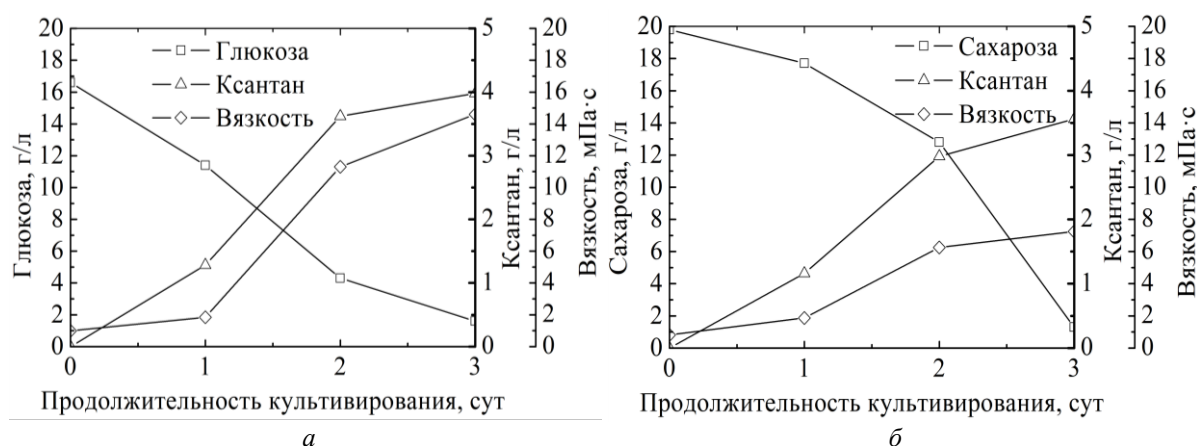


Рис. 1. Показатели процесса культивирования (в колбах) бактерий *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 на средах с гидролизатом пшеницы (а) и мелассой (б)
Fig. 1. Parameters of the cultivation process (in flasks) of *Xanthomonas campestris* VKPM B-6720 bacteria on media with wheat hydrolysate (a) and molasse (b)

Представленные на рис. 1, а данные свидетельствуют о наибольшем увеличении вязкости и приросте содержания ксантана во вторые сутки культивирования. Глюкоза в первые двое суток расходовалась относительно равномерно, и лишь в последние сутки ее потребление замедлилось.

Как видно из графика (рис. 1, б), максимальное потребление сахарозы наблюдалось в третьи сутки, однако наибольший прирост вязкости и содержания ксантана так же, как в случае с глюкозой, происходил в первые двое суток.

Вязкость среды, содержащей пшеничный гидролизат, после двух суток культивирования возрастала значительно интенсивнее по сравнению со средой на мелассе. Мы считаем, это связано с тем, что среда на пшеничном гидролизате содержит глюкозу, которая быстрее усваивается, тогда как в среде на мелассе необходимо протекание дополнительной ферментативной реакции по гидролизу сахарозы, что приводит к замедлению процесса образования ксантана.

Вместе с тем по количеству образовавшегося ксантана обе среды не сильно различались; таким образом, различия в вязкости двух сред, вероятно, объясняются различной структурой образовавшегося ксантана и/или его молекулярной массой.

Накопление биомассы в процессе культивирования представлено на рис. 2.

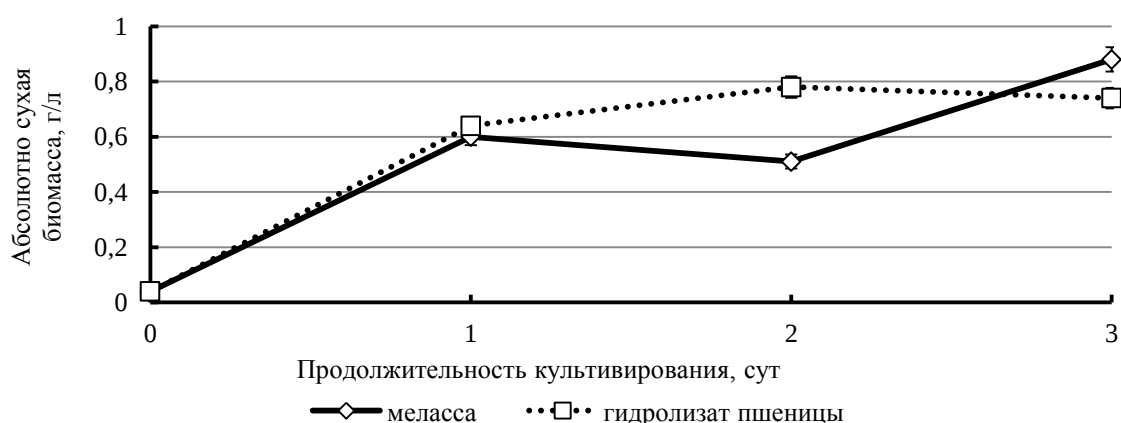


Рис. 2. Накопление биомассы в среде в процессе культивирования (в колбах) *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 на средах с мелассой и гидролизатом пшеницы
Fig. 2. Biomass accumulation in the medium during fermentation (in flasks) of *Xanthomonas campestris* VKPM B-6720 on media with molasses and wheat hydrolysate

Из рис. 2 видно, что основной прирост биомассы происходил в первые сутки культивирования; в дальнейшем ее количество стабилизировалось. Прирост биомассы на гидролизате пшеницы, т. е. при использовании глюкозы в качестве источника углерода, шел более интенсивно, чем прирост на мелассе.

На следующем этапе исследований осуществляли культивирование бактерий *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 в сосуде объемом 2 000 мл, содержащем 500 мл среды, и с интенсивной аэрацией. Изменение показателей процесса культивирования (на установке) на питательных средах с гидролизатом пшеницы и мелассой представлено на рис. 3, а и б.

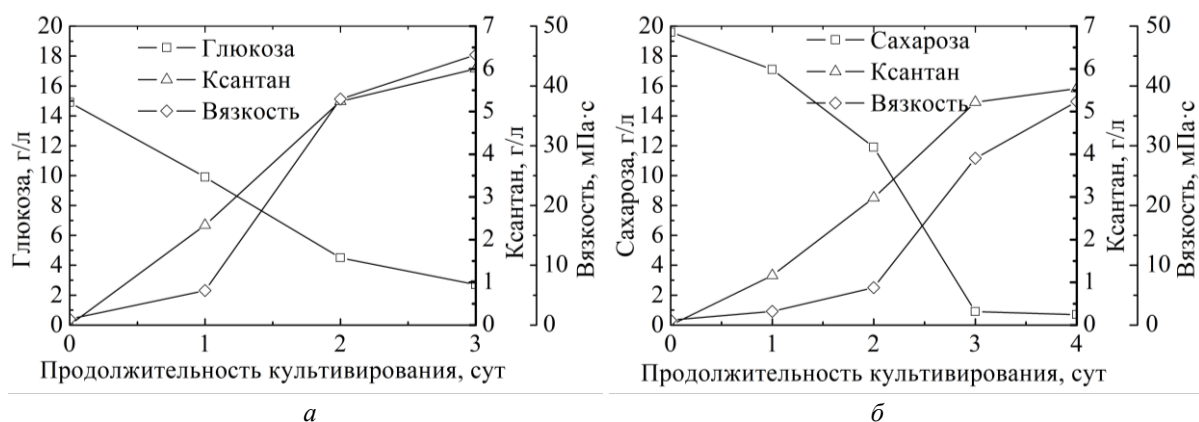


Рис. 3. Показатели процесса культивирования (в сосуде с интенсивной аэрацией) бактерий *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 на питательных средах с гидролизатом пшеницы (а) и мелассой (б)

Fig. 3. Parameters of the fermentation process (in the intensively aerated vessel) of *Xanthomonas campestris* VKPM B-6720 bacteria on media with wheat hydrolysate (a) and molasse (b)

Снижение содержания глюкозы и нарастание количества ксантана в среде с гидролизатом пшеницы были практически линейными в первые двое суток и замедлялись на третьи сутки культивирования, в то время как наибольший прирост вязкости наблюдался на вторые сутки. Конечные показатели выхода ксантана и вязкости среды на установке существенно возросли по сравнению с культивированием в колбах вследствие лучшей аэрации среды. Выход увеличился в полтора раза, а вязкость – в три раза.

Значительное увеличение вязкости культуральной жидкости при культивировании в сосуде с интенсивной аэрацией по сравнению с культуральными жидкостями из колб свидетельствует о большей степени полимеризации образовавшегося ксантана и/или увеличении количества связей с пировиноградной кислотой.

Приняв во внимание тот факт, что при росте на среде с мелассой метаболизм бактерий включает дополнительную реакцию по гидролизу сахарозы, было решено осуществлять процесс ферментации на мелассе в течение 4 суток.

При культивировании бактерий на мелассе в сосуде с интенсивной аэрацией наиболее активное потребление сахарозы наблюдалось на вторые и третьи сутки, количество образующегося ксантана равномерно росло в течение первых трех суток и замедлялось на четвертые, а вязкость среды интенсивнее всего росла на третьи сутки, но и в течение четвертых суток также был замечен прирост по сравнению с первыми двумя сутками культивирования. Также отмечалось существенное повышение выхода ксантана (в 1,5 раза) и вязкости среды (в 3–5 раз) по сравнению с этими показателями, полученными при выращивании в колбах на том же источнике углеводов. По нашему мнению, ключевую роль здесь сыграло усиление аэрации среды.

Более низкая скорость усвоения субстрата при культивировании на среде, содержащей сахарозу, по сравнению с глюкозосодержащей средой, возможно, обусловлена необходимостью перестройки метаболизма бактерий с одного источника углерода на другой, так как культура для инокуляции выращивалась на агаризованной среде с глюкозой, либо ингибирующим действием компонентов мелассы, либо совместным действием обоих вышеперечисленных факторов.

Замедление биосинтеза ксантана, наблюдаемое на четвертые сутки, обусловлено истощением питательных веществ в среде и накоплением продуктов метаболизма.

Сравнение изменения вязкости двух сред наглядно демонстрирует отставание процессов биосинтеза полисахарида на среде с мелассой по сравнению с богатой глюкозой средой. Даже дополнительные сутки культивирования не позволили вязкости среды с мелассой достигнуть уровня среды на пшеничном гидролизате. Наиболее интенсивно возрастание вязкости на среде с пшеничным гидролизатом происходило во вторые сутки, а на среде с мелассой – в течение третьих и четвертых суток.

Процесс биосинтеза ксантана на среде с глюкозой шел более интенсивно, и конечное его содержание в ней было на 0,5 г/л больше, чем на среде с мелассой.

Динамика изменения активной кислотности среды в процессе культивирования бактерий *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 (на установке) на обеих средах представлена на рис. 4.

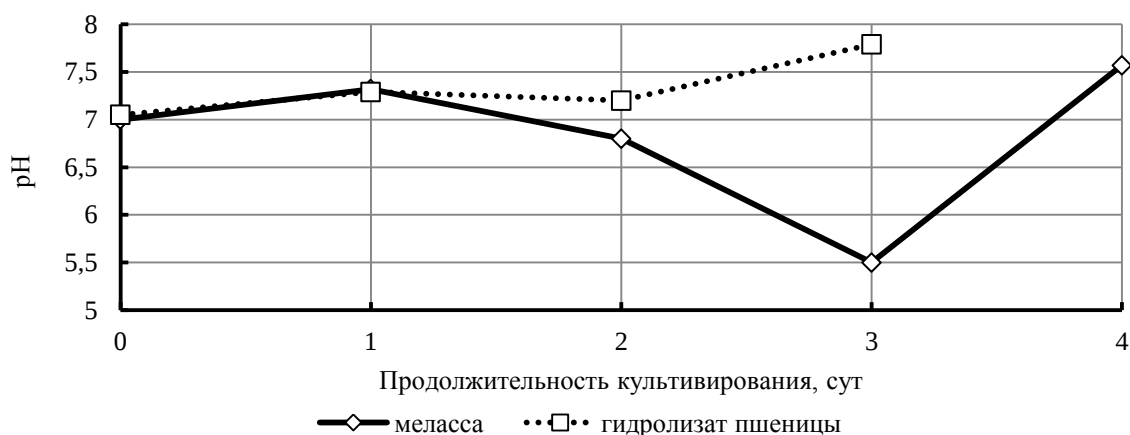


Рис. 4. pH среды в процессе культивирования (на установке) бактерий *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 на средах с мелассой и гидролизатом пшеницы
Fig. 4. pH of the media during the fermentation (in the system) of *Xanthomonas campestris* VKPM B-6720 bacteria on media with molasses and wheat hydrolysate

В первые двое суток культивирования значение pH изменялось мало и было близко к нейтральному независимо от типа среды. Конечные значения pH указывали на защелачивание обоих типов сред, что свидетельствует о начавшемся автолизе биомассы бактерий, который сопровождается выделением аммиака, повышающего pH.

Накопление биомассы в процессе культивирования бактерий *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 в сосуде с интенсивной аэрацией представлено на рис. 5.

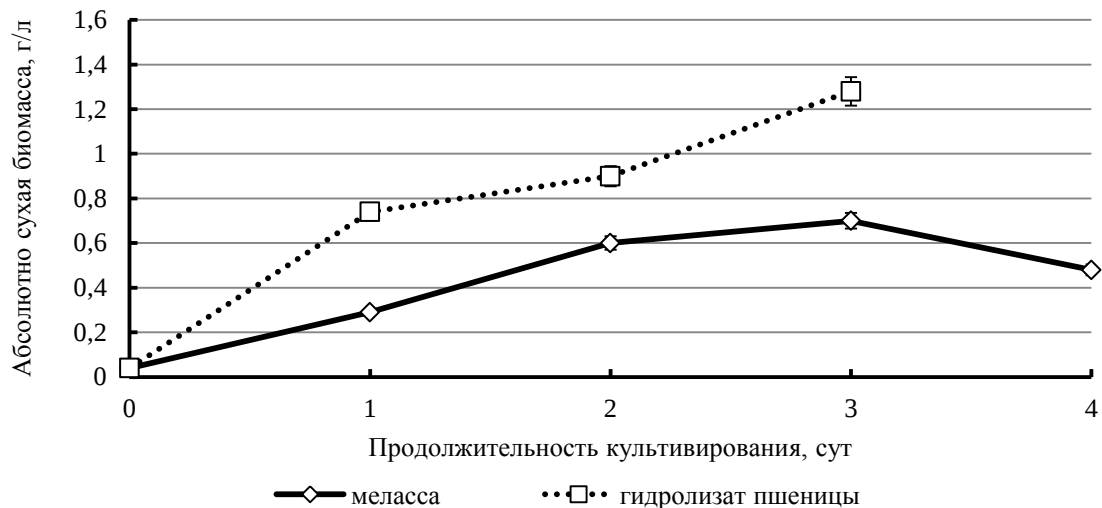


Рис. 5. Накопление биомассы в среде в процессе культивирования (на установке) *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 на средах с мелассой и гидролизатом пшеницы
Fig. 5. Biomass accumulation in the medium during the fermentation process (in the system) of *Xanthomonas campestris* VKPM B-6720 on media with molasses and wheat hydrolysate

Из рис. 5 видно, что практически в течение всего периода культивирования на установке количество биомассы возрастало, исключение составили только четвертые сутки при росте бактерий на мелассе, в течение которого количество биомассы начало уменьшаться. Уменьшение биомассы связано с нехваткой питательных веществ в последние сутки, из-за чего начался автолиз клеток с выделением аммиака в результате дезаминирования аминокислот, что привело к росту pH с 5,5 до 7,5 в этот же период времени (рис. 4).

При сравнении количества образовавшейся биомассы в колбах и на установке видно, что на мелассе образование биомассы шло с одинаковой интенсивностью независимо от объема среды и условий

культивирования, а при росте на гидролизате пшеницы количество биомассы при выращивании на установке было в 1,5 раза больше, чем при росте в колбах, вследствие лучшей аэрации.

Максимальная концентрация биомассы наблюдалась при росте культуры *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 на среде, приготовленной на основе гидролизата пшеницы, т. е. на глюкозе как источнике углерода, но при условии хорошей аэрации. При слабой аэрации существенных различий по количеству биомассы между субстратом, содержащим сахарозу, и субстратом с глюкозой нет. Больше ксантана также образовывалось на средах с глюкозой при всех условиях культивирования.

При культивировании бактерий в сосуде с интенсивной аэрацией синтезировалось заметно больше полисахарида по сравнению с ростом в колбах. Экономический коэффициент биосинтеза ксантана Y_p/s при росте на гидролизате пшеницы составил 0,24 в колбах и 0,40 на установке, а при росте на мелассе 0,18 и 0,28 соответственно.

Полученный продукт после выделения и высушивания представлял собой порошок коричневого цвета, если культивирование шло на мелассе, и светло-желтого, если на гидролизате пшеницы (рис. 6).

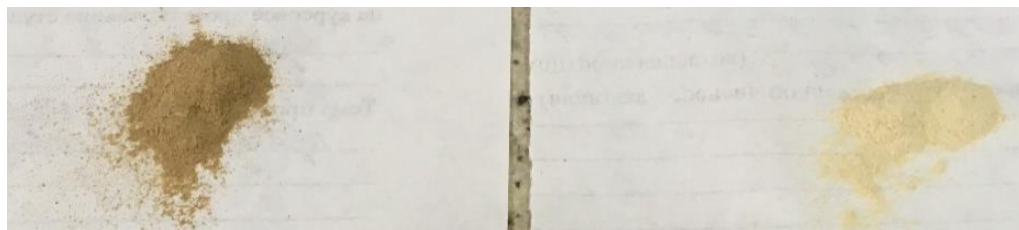


Рис. 6. Внешний вид ксантана, полученного на мелассе (слева) и на гидролизате пшеницы (справа)

Fig. 6. Appearance of the xanthan produced on molasses (left) and on wheat hydrolysate (right)

Физико-химические свойства полученного ксантана и промышленного ксантана, взятого для сравнения, представлены в табл. 2. В качестве образца для сравнения использовался ксантан фирмы Shendung Fufeng Biotechnologies Co. (Китай).

Таблица 2. Физико-химические свойства образцов ксантана

Table 2. Physicochemical properties of xanthan gum samples

Показатель	Среда		Промышленный ксантан Shendung Fufeng Biotechnologies Co.
	на мелассе	пшеничном гидролизате	
Влажность, %	11,1 ± 0,1	12,5 ± 0,1	11,5 ± 0,1
Зольность, % на сухое вещество	9,8 ± 0,1	10,5 ± 0,1	6,0 ± 0,1
pH 1%-го раствора	6,78 ± 0,03	7,90 ± 0,03	7,05 ± 0,03
Вязкость 1%-го раствора при 25 °C, мПа·с	71,7 ± 0,2	75,0 ± 0,2	246 ± 0,3

Зольность ксантана, полученного в лабораторных условиях, была выше по сравнению с промышленным образцом вследствие недостаточно эффективной очистки от примесей культуральной жидкости.

Ключевой характеристикой ксантана является его вязкость. Вязкость лабораторных образцов была более чем в три раза ниже, чем у китайского аналога. Это может быть обусловлено особенностями штамма, взятого для исследований, несбалансированным составом питательной среды и неоптимальными условиями культивирования.

Для установления соответствия состава ксантана, полученного в лаборатории, промышленному образцу проводили хроматографическое определение содержащихся в нем моносахаридов. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Углеводный состав образцов ксантана

Table 3. Carbohydrate composition of xanthan gum samples

Вещество	Ксантан	
	лабораторный	промышленный
Глюкоза, %	39,85	39,94
Манноза, %	39,44	39,75
Глукуроновая кислота, %	18,83	19,55
Рамноза, %	1,10	0,24
Арабиноза, %	0,25	0,21
Ксилоза, %	0,53	0,31

Как видно из табл. 3, углеводный состав обоих образцов ксантана был сходным, особенно по содержанию глюкозы и маннозы, что согласуется с литературными данными по соотношению глюкозы, маннозы и глюкуроновой кислоты (2:2:1 соответственно) (*Rosalam et al., 2006*). Заметные различия между промышленным и лабораторным образцами ксантана выявлены в содержании примесных рамнозы и ксилозы, количество которых в лабораторном образце было несколько выше.

Для сравнения морфологии поверхности лабораторного и промышленного образцов ксантана и элементного состава их золы использовали автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп Merlin компании Carl Zeiss (Германия), оснащенный детектором элементного анализа Aztec X-MAX. Изображения поверхности лабораторного и промышленного образцов ксантана представлены на рис. 7, элементный состав – в табл. 4.

Таблица 4. Элементный состав образцов золы ксантана
Table 4. Elemental composition of xanthan gum ashes

Элемент	Тип линии	Ксантан лабораторный		Ксантан промышленный		Эталон
		Мас. %	Ат. %	Мас. %	Ат. %	
Na	К серия	0,46	0,30	1,71	1,04	Albite
Mg	К серия	0,20	0,12	–	–	MgO
Al	К серия	0,24	0,13	0,06	0,03	Al ₂ O ₃
Si	К серия	0,40	0,21	–	–	SiO ₂
P	К серия	0,79	0,38	–	–	GaP
S	К серия	0,38	0,18	–	–	FeS ₂
Cl	К серия	4,00	1,68	1,31	0,52	NaCl
K	К серия	12,10	4,62	0,06	0,02	KBr
Ca	К серия	0,34	0,13	2,41	0,84	Wollastonite
Cu	К серия	0,24	0,06	0,39	0,08	Cu
Sn	L серия	0,17	0,02	–	–	Sn

Промышленный образец ксантана имел волокнистую структуру, что особенно заметно на фотографиях (рис. 7) с большим увеличением (200 нм и 1 мкм). Это обусловлено тем, что основная полисахаридная цепь ксантана по структуре аналогична целлюлозе. О волокнистой морфологии ксантана, наблюдаемой на фотографиях, полученных при помощи сканирующего электронного микроскопа, сообщается в исследовании (*Nejadmansouri et al., 2020*). Структура лабораторного ксантана была чешуйчатая, что может быть связано с недостаточной полимеризацией ксантана и большим количеством примесей.

Промышленный образец ксантана имел в своем составе меньше элементов, что согласуется с данными о его меньшей зольности (табл. 2). Однако доля натрия, кальция и меди у промышленного образца была выше. Большое разнообразие примесей в лабораторном ксантане обусловлено недостаточно эффективной очисткой образца в процессе выделения. Следует отметить, что очистка ксантана является отдельной задачей, требующей комплексного научного подхода для своего решения и лежащей пока за рамками данного исследования.

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сформулировать следующие положения:

- исследованные источники углерода целесообразно использовать для получения ксантана штаммом ВКПМ В-6720; гидролизат пшеницы предпочтителен, так как эффективность конверсии глюкозы в ксантан выше, чем сахарозы;
- интенсификация аэрации повышает степень конверсии углевода в продукт в 1,6 раза, увеличивает выход ксантана на 2 г/л; при этом вязкость культуральной жидкости возрастает в 3–5 раз;
- ксантан, получаемый на гидролизате пшеницы, содержит меньше окрашивающих веществ, чем ксантан, полученный на мелассе.

Таким образом, выбранный штамм *Xanthomonas campestris* ВКПМ В-6720 эффективно конвертирует глюкозу и сахарозу в полисахарид ксантан; повышение качественных показателей и выхода ксантана осуществляется посредством интенсификации аэрации питательной среды.

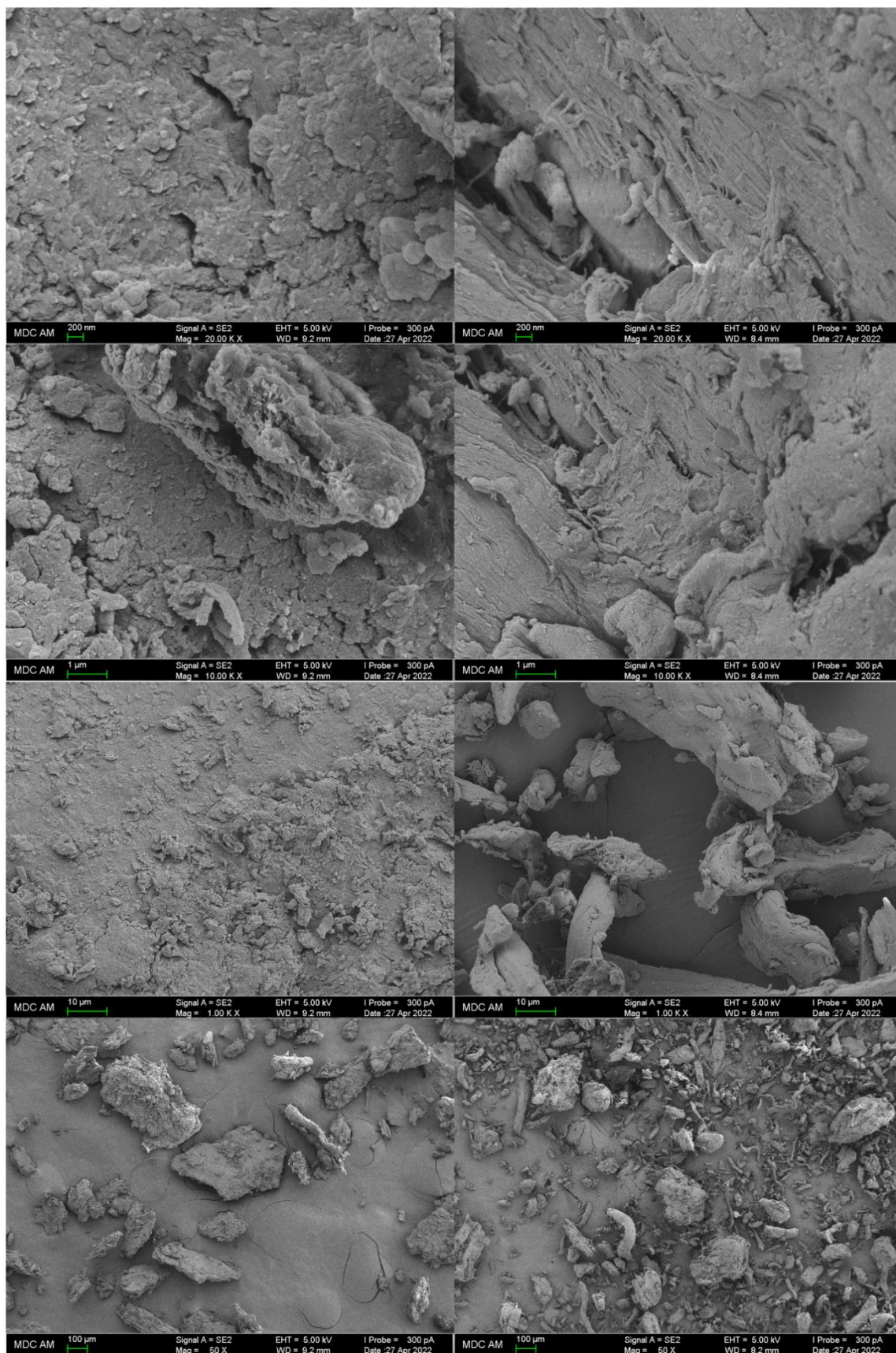


Рис. 7. Морфология поверхности ксантана, произведенного в лаборатории на гидролизате пшеницы (слева) и промышленного образца (справа)

Fig. 7. Surface morphology of laboratory and industrial xanthan gum; on the left is xanthan gum produced in the laboratory using wheat hydrolysate; on the right it is the industrial sample

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Абаас А. М., Мингазов Р. Р., Курышов Д. А., Башкирцева Н. Ю. Загустители в составе промывочных жидкостей для капитального ремонта скважин // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 20. С. 255–258. EDN: RFUUNZ.
- Аржакова О. В., Аржаков М. С., Бадамшина Э. Р., Брюзгина Е. Б. [и др.]. Полимеры будущего // Успехи химии. 2022. Т. 91, № 12. Номер статьи: 5062. DOI: <https://doi.org/10.57634/RCR5062>. EDN: EFUAAB.
- Асасе Р. В., Середович Д. А., Пирогов М. В., Глухарева Т. В. Применение отходов производства соевого молока в биотехнологии ксантановой камеди // BIOAsia Altai 2024 : материалы IV Междунар. биотехнологического форума, Барнаул, 23–28 сентября 2024 г. Барнаул, 2024. С. 373–377. EDN: ZENIME.
- Богатырева А. О., Сапунова Н. Б., Щанкин М. В., Лияськина Е. В. [и др.]. Получение бактериальных экзополисахаридов на средах с отходами биотехнологических производств // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19, № 24. С. 142–145. EDN: XDXXED.
- Илалова Г. Ф., Ямашев Т. А., Сафин Р. Р., Мингалеева З. Ш. Разработка технологии переработки древесного сырья для получения биополимеров и продуктов на их основе // Деревообрабатывающая промышленность. 2024. № 4. С. 64–74. EDN: LQFZII.
- Магадова Л. А., Потешкина К. А., Давлетшина Л. Ф., Дмитриев Я. О. Ксантан как универсальный полимер для нефтегазодобычи и продукт биотехнологии // Нефтегазовое дело. 2023. № 5. С. 55–82. DOI: <https://doi.org/10.17122/ogbus-2023-5-55-82>. EDN: KLOSBK.
- Мухутдинов Р. Р., Пилипенко Т. В., Кручина-Богданов И. В. Идентификация порошкообразных продуктов методом газовой хроматографии с предварительной дериватизацией проб // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Пищевые и биотехнологии. 2019. Т. 7, № 4. С. 75–84. EDN: NVAEHF.
- Саляхова А. Р., Садриева А. А., Залялова Л. И., Солуянова А. А. [и др.]. Исследование процесса очистки гидролизатов пшеницы методом фильтрации // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 22. С. 263–265. EDN: TALNHT.
- Способ получения ксанта́на : пат. № 2833078 Рос. Федерация / Р. Р. Сафин, Т. А. Ямашев, Г. Ф. Илалова, З. Ш. Мингалеева. № 2024114691 ; заявл. 30.05.2024 ; опубл. 14.01.2025, Бюл. № 2. EDN: VTCDSF.
- Хисаметдинов М. Р., Гамаюрова В. С., Сагдеева Р. Р., Крыницкая А. Ю. [и др.]. Влияние состава питательной среды на рост культуры *Xanthomonas campestris* и синтез экзополисахарида ксанта́на // Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 2. С. 104–110. EDN: KDMZAJ.
- Abd El-Salam M. H., Fadel M. A., Murad H. A. Bioconversion of sugarcane molasses into xanthan gum // Journal of Biotechnology. 1994. Vol. 33, Iss. 1. P. 103–106. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1656\(94\)90103-1](https://doi.org/10.1016/0168-1656(94)90103-1).
- Bajić B. Ž., Vučurović D. G., Dodić S. N., Grahovac J. A. [et al.]. Process model economics of xanthan production from confectionery industry wastewaters // Journal of Environmental Management. 2017. Vol. 203, Part 3. P. 999–1004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.055>.
- Bangalore D. V., Bellmer D. D. Microbubbles for enhancement of oxygen transfer in xanthan gum fermentation // Chemical Engineering Communications. 2006. Vol. 193, Iss. 10. P. 1232–1252. DOI: <https://doi.org/10.1080/00986440500440181>.
- Berninger T., Dietz N., López Ó. G. Water-soluble polymers in agriculture: Xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics // Microbial Biotechnology. 2021. Vol. 14, Iss. 5. P. 1881–1896. DOI: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13867>.
- Candia J.-L.F., Deckwer W.-D. Effect of the nitrogen source on pyruvate content and rheological properties of xanthan // Biotechnology Progress. 1999. Vol. 15. P. 446–452. DOI: <https://doi.org/10.1021/bp990028i>.
- Cao H., Ai L., Yang Z., Zhu Y. Application of xanthan gum as a pre-treatment and sharpness evaluation for inkjet printing on polyester // Polymers. 2019. Vol. 11, Iss. 9. Article number: 1504. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11091504>.
- Carignatto C. R. R., Oliveira K. S. M., de Lima V. M. G., de Oliva Neto P. New culture medium to xanthan production by *Xanthomonas campestris* pv. *Campestris* // Indian Journal of Microbiology. 2011. Vol. 51. P. 283–288. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12088-011-0171-9>.
- Cortes H., Caballero-Florán I. H., Mendoza-Muñoz N., Escutia-Guadarrama L. [et al.]. Xanthan gum in drug release // Cellular and Molecular Biology. 2020. Vol. 66, Iss. 4. P. 199–207. DOI: <https://doi.org/10.14715/cmb/2020.66.4.24>.
- da Silva J. A., Cardoso L. G., de Jesus Assis D., Gomes G. V. P. [et al.]. Xanthan gum production by *Xanthomonas campestris* pv. *Campestris* IBSBF 1866 and 1867 from lignocellulosic agroindustrial wastes // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2018. Vol. 186. P. 750–763. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-018-2765-8>.

- de Sousa Costa L. A., Campos M. I., Druzian J. I., de Oliveira A. M. [et al.]. Biosynthesis of xanthan gum from fermenting shrimp shell: Yield and apparent viscosity // International Journal of Polymer Science. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/273650>.
- Furtado I. F. S. P. C., Sydney E. B., Rodrigues S. A., Sydney A. C. N. Xanthan gum: Applications, challenges, and advantages of this asset of biotechnological origin // Biotechnology Research and Innovation. 2022. Vol. 6, N 1. Article number: e202204. DOI: <https://doi.org/10.4322/biori.202205>.
- García-Ochoa F., Santos V. E., Casas J. A., Gómez E. Xanthan gum: Production, recovery, and properties // Biotechnology Advances. 2000. Vol. 18, Iss. 7. P. 549–579. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1).
- Kool M. M., Gruppen H., Sworn G., Schols H. A. Comparison of xanthans by the relative abundance of its six constituent repeating units // Carbohydrate Polymers. 2013. Vol. 98, Iss. 1. P. 914–921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.003>.
- Krishna Leela J., Sharma G. Studies on xanthan production from *Xanthomonas campestris* // Bioprocess Engineering. 2000. Vol. 23. P. 687–689. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004499900054>.
- Kumar S., Yadav B. D., Raj R. A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil // Discover Applied Sciences. 2024. Vol. 6. Article number: 393. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06087-7>.
- Kumara S. M., Khan Behlol A., Rohit K. C., Purushotham B. Effect of carbon and nitrogen sources on the production of xanthan gum from *Xanthomonas campestris* isolated from soil // Archives of Applied Science Research. 2012. Vol. 4, Iss. 6. P. 2507–2512.
- Kwon Y.-M., Moon J.-H., Cho G.-C., Kim Y.-U. [et al.]. Xanthan gum biopolymer-based soil treatment as a construction material to mitigate internal erosion of earthen embankment: A field-scale // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 389. Article number: 131716. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131716>.
- Layek B. A Comprehensive review of xanthan gum-based oral drug delivery systems // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25, Iss. 18. Article number: 10143. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms251810143>.
- Masoumi A., Farokhzad R., Ghasemi S. H. The role of xanthan gum in predicting durability properties of self-compacting concrete (SCC) in mix designs // Buildings. 2023. Vol. 13, Iss. 10. Article number: 2605. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13102605>.
- Moosavi A., Karbassi A. Bioconversion of sugar-beet molasses into xanthan gum // Journal of Food Processing and Preservation. 2010. Vol. 34. P. 316–322. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00376.x>.
- Nejadmansouri M., Shad E., Razmjooei M., Safdarianghomsheh R. [et al.]. Production of xanthan gum using immobilized *Xanthomonas campestris* cells: Effects of support type // Biochemical Engineering Journal. 2020. Vol. 157. Article number: 107554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107554>.
- Niknezhad S. V., Asadollahi M. A., Zamani A., Biria D. Production of xanthan gum by *Xanthomonas* species using starch as carbon source // Minerva Biotecnologica. 2014. Vol. 26, N 3. P. 191–197.
- Ozdamar M., Kurbanoglu E. B. Valorisation of chicken feathers for xanthan gum production using *Xanthomonas campestris* MO-03 // Journal of Genetic Engineering and Biotechnology. 2018. Vol. 16, Iss. 2. P. 259–263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.07.005>.
- Palaniraj A., Jayaraman V. Production, recovery and applications of xanthan gum by *Xanthomonas campestris* // Journal of Food Engineering. 2011. Vol. 106, Iss. 1. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.035>.
- Rashidi A. R., Azelee N. I. W., Zaidel D. N. A., Chuah L. F. [et al.]. Unleashing the potential of xanthan: A comprehensive exploration of biosynthesis, production, and diverse applications // Bioprocess and Biosystems Engineering. 2023. Vol. 46. P. 771–787. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00449-023-02870-9>.
- Rosalam S., England R. Review of xanthan gum production from unmodified starches by *Xanthomonas campestris* sp. // Enzyme and Microbial Technology. 2006. Vol. 39, Iss. 2. P. 197–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.10.019>.
- Savvides A. L., Katsifas E. A., Hatzinikolaou D. G., Karagouni A. D. Xanthan production by *Xanthomonas campestris* using whey permeate medium // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2012. Vol. 28. P. 2759–2764. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-012-1087-1>.
- Seviour R. J., McNeil B., Fazenda M. L., Harvey L. M. Operating bioreactors for microbial exopolysaccharide production // Critical Reviews in Biotechnology. 2011. Vol. 31, Iss. 2. P. 170–185. DOI: <https://doi.org/10.3109/07388551.2010.505909>.
- Shamala T. R., Prasad M. S. Fed-batch fermentation for rapid production of xanthan by *Xanthomonas campestris* // Food Biotechnology. 2001. Vol. 15, Iss. 3. P. 169–177. DOI: <https://doi.org/10.1081/FBT-100107628>.
- Silva M. F., Fornari R. C. G., Mazutti M. A., de Oliveira D. [et al.]. Production and characterization of xanthan gum by *Xanthomonas campestris* using cheese whey as sole carbon source // Journal of Food Engineering. 2009. Vol. 90, Iss. 1. P. 119–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.010>.

- Song Z., Ling P., Zang H., Li L. [et al.]. Development, validation and influence factor analysis of a near-infrared method for the molecular weight determination of xanthan gum // *Carbohydrate Polymers*. 2015. Vol. 115. P. 582–588. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.079>.
- Souw P., Demain A. L. Nutritional studies on xanthan production by *Xanthomonas campestris* NRRL B1459 // *Applied and Environmental Microbiology*. 1979. Vol. 37. P. 1186–1192. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.37.6.1186-1192.1979>.
- Sujithra B., Deepika S., Akshaya K., Ponnusami V. Production and optimization of xanthan gum from three-step sequential enzyme treated cassava bagasse hydrolysate // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2019. Vol. 21. Article number: 101294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101294>.
- Woiciechowski A. L., Soccol C. R., Rocha S. N., Pandey A. Xanthan gum production from cassava bagasse hydrolysate with *Xanthomonas campestris* using alternative sources of nitrogen // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2004. Vol. 118. P. 305–312. DOI: <https://doi.org/10.1385/ABAB:118:1-3:305>.
- Wu M., Qu J., Shen Y., Dai X. [et al.]. Gel properties of xanthan containing a single repeating unit with saturated pyruvate produced by an engineered *Xanthomonas campestris* CGMCC 15155 // *Food Hydrocolloids*. 2019. Vol. 87. P. 747–757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.09.002>.
- Yoo S. D., Harcum S. W. Xanthan gum production from waste sugar beet pulp // *Bioresource Technology*. 1999. Vol. 70, Iss. 1. P. 105–109. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00013-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00013-9).

References

- Abaas, A. M., Mingazov, R. R., Kuryashov, D. A., Bashkirtseva, N. Yu. 2013. Thickeners in the composition of drilling fluids for well workover. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 16(20), pp. 255–258. EDN: RFUHZ. (In Russ.)
- Arzhakova, O. V., Arzhakov, M. S., Badamshina, E. R., Bryuzgina, E. B. et al. 2022. Polymers of the future. *Russian Chemical Reviews*, 91(12). Article number: 5062. DOI: <https://doi.org/10.57634/RCR5062>. EDN: EFUAAB. (In Russ.)
- Asase, R. V., Seredovich, D. A., Pirogov, M. V., Glukhareva, T. V. 2024. Use of soy milk production waste in xanthan gum biotechnology // *BIOAsia Altai 2024: Proceedings of the IV International Biotechnology Forum*, Barnaul, September 23–28, 2024. Barnaul, pp. 373–377. EDN: ZENIME. (In Russ.)
- Bogatyрева, A. O., Sapunova, N. B., Shchankin, M. V., Liyaskina, E. V. et al. 2016. Production of bacterial exopolysaccharides on media with waste from biotechnological production. *Herald of Technological University*, 19(24), pp. 142–145. EDN: XDXXED. (In Russ.)
- Ilalova, G. F., Yamashev, T. A., Safin, R. R., Mingaleeva, Z. Sh. 2024. Development of technology for processing wood raw materials to obtain biopolymers and products based on them. *Woodworking Industry*, 4, pp. 64–74. EDN: LQFZII. (In Russ.)
- Magadova, L. A., Poteskina, K. A., Davletshina, L. F., Dmitriev, Ya. O. 2023. Xanthan as a universal polymer for oil and gas production and a biotechnology product. *Oil and Gas Business*, 5, pp. 55–82. DOI: <https://doi.org/10.17122/ogbus-2023-5-55-82>. EDN: KLOSBK. (In Russ.)
- Mukhutdinov, R. R., Pilipenko, T. V., Kruchina-Bogdanov, I. V. 2019. Identification of powdered products by gas chromatography with preliminary derivatization of samples. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 7(4), pp. 75–84. EDN: NVAEHF. (In Russ.)
- Salyakhova, A. R., Sadrieva, A. A., Zalyalova, L. I., Soluyanov, A. A. et al. 2014. Study of the process of purification of wheat hydrolysates by filtration. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 17(22), pp. 263–265. EDN: TALNHT. (In Russ.)
- Safin, R. R., Yamashev, T. A., Ilalova, G. F., Mingaleeva, Z. Sh. Applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University". 2025. Method for producing xanthan gum, Russian Federation, Pat. 2833078. EDN: VTCDSE. (In Russ.)
- Khisametdinov, M. R., Gamayurova, V. S., Sagdeeva, R. R., Krynitskaya, A. Yu. et al. 2009. Influence of the composition of the nutrient medium on the growth of *Xanthomonas campestris* culture and the synthesis of xanthan exopolysaccharide. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2, pp. 104–110. EDN: KDMZAJ. (In Russ.)
- Abd El-Salam, M. H., Fadel, M. A., Murad, H. A. 1994. Bioconversion of sugarcane molasses into xanthan gum. *Journal of Biotechnology*, 33(1), pp. 103–106. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1656\(94\)90103-1](https://doi.org/10.1016/0168-1656(94)90103-1).
- Bajić, B. Ž., Vučurović, D. G., Dodić, S. N., Grahovac, J. A. et al. 2017. Process model economics of xanthan production from confectionery industry wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 203(3), pp. 999–1004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.055>.

- Bangalore, D. V., Bellmer, D. D. 2006. Microbubbles for enhancement of oxygen transfer in xanthan gum fermentation. *Chemical Engineering Communications*, 193(10), pp. 1232–1252. DOI: <https://doi.org/10.1080/00986440500440181>.
- Berninger, T., Dietz, N., López, Ó. G. 2021. Water-soluble polymers in agriculture: Xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics. *Microbial Biotechnology*, 14(5), pp. 1881–1896. DOI: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13867>.
- Candia, J.-L.F., Deckwer, W.-D. 1999. Effect of the nitrogen source on pyruvate content and rheological properties of xanthan. *Biotechnology Progress*, 15, pp. 446–452. DOI: <https://doi.org/10.1021/bp990028i>.
- Cao, H., Ai, L., Yang, Z., Zhu, Y. 2019. Application of xanthan gum as a pre-treatment and sharpness evaluation for inkjet printing on polyester. *Polymers*, 11(9). Article number: 1504. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11091504>.
- Carignatto, C. R. R., Oliveira, K. S. M., de Lima, V. M. G., de Oliva Neto, P. 2011. New culture medium to xanthan production by *Xanthomonas campestris* pv. *Campestris*. *Indian Journal of Microbiology*, 51, pp. 283–288. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12088-011-0171-9>.
- Cortes, H., Caballero-Florán, I. H., Mendoza-Muñoz, N., Escutia-Guadarrama, L. et al. 2020. Xanthan gum in drug release. *Cellular and Molecular Biology*, 66(4), pp. 199–207. DOI: <https://doi.org/10.14715/cmb/2020.66.4.24>.
- da Silva, J. A., Cardoso, L. G., de Jesus Assis, D., Gomes, G. V. P. et al. 2018. Xanthan gum production by *Xanthomonas campestris* pv. *Campestris* IBSBF 1866 and 1867 from lignocellulosic agroindustrial wastes. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 186, pp. 750–763. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-018-2765-8>.
- de Sousa Costa, L. A., Campos, M. I., Druzian, J. I., de Oliveira, A. M. et al. 2014. Biosynthesis of xanthan gum from fermenting shrimp shell: Yield and apparent viscosity. *International Journal of Polymer Science*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/273650>.
- Furtado, I. F. S. P. C., Sydney, E. B., Rodrigues, S. A., Sydney, A. C. N. 2022. Xanthan gum: Applications, challenges, and advantages of this asset of biotechnological origin. *Biotechnology Research and Innovation*, 6(1). Article number: e202204. DOI: <https://doi.org/10.4322/biori.202205>.
- García-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., Gómez, E. 2000. Xanthan gum: Production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*, 18(7), pp. 549–579. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1).
- Kool, M. M., Gruppen, H., Sworn, G., Schols, H. A. 2013. Comparison of xanthans by the relative abundance of its six constituent repeating units. *Carbohydrate Polymers*, 98(1), pp. 914–921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.003>.
- Krishna Leela, J., Sharma, G. 2000. Studies on xanthan production from *Xanthomonas campestris*. *Bioprocess Engineering*, 23, pp. 687–689. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004499900054>.
- Kumar, S., Yadav, B. D., Raj, R. 2024. A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil. *Discover Applied Sciences*, 6. Article number: 393. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06087-7>.
- Kumara, S. M., Khan Behlol, A., Rohit, K. C., Purushotham, B. 2012. Effect of carbon and nitrogen sources on the production of xanthan gum from *Xanthomonas campestris* isolated from soil. *Archives of Applied Science Research*, 4(6), pp. 2507–2512.
- Kwon, Y.-M., Moon, J.-H., Cho, G.-C., Kim, Y.-U. et al. 2023. Xanthan gum biopolymer-based soil treatment as a construction material to mitigate internal erosion of earthen embankment: A field-scale. *Construction and Building Materials*, 389. Article number: 131716. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131716>.
- Layek, B. 2024. A comprehensive review of xanthan gum-based oral drug delivery systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(18). Article number: 10143. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms251810143>.
- Masoumi, A., Farokhzad, R., Ghasemi, S. H. 2023. The role of xanthan gum in predicting durability properties of self-compacting concrete (SCC) in mix designs. *Buildings*, 13(10). Article number: 2605. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13102605>.
- Moosavi, A., Karbassi, A. 2010. Bioconversion of sugar-beet molasses into xanthan gum. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34, pp. 316–322. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00376.x>.
- Nejadmansouri, M., Shad, E., Razmjooei, M., Safdarianghomsheh, R. et al. 2020. Production of xanthan gum using immobilized *Xanthomonas campestris* cells: Effects of support type. *Biochemical Engineering Journal*, 157. Article number: 107554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107554>.
- Niknezhad, S. V., Asadollahi, M. A., Zamani, A., Biria, D. 2014. Production of xanthan gum by *Xanthomonas* species using starch as carbon source. *Minerva Biotechnologica*, 26(3), pp. 191–197.
- Ozdağ, M., Kurbanoglu, E. B. 2018. Valorisation of chicken feathers for xanthan gum production using *Xanthomonas campestris* MO-03. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 16(2), pp. 259–263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.07.005>.

- Palaniraj, A., Jayaraman, V. 2011. Production, recovery and applications of xanthan gum by *Xanthomonas campestris*. *Journal of Food Engineering*, 106(1), pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.035>.
- Rashidi, A. R., Azelee, N. I. W., Zaidel, D. N. A., Chuah, L. F. et al. 2023. Unleashing the potential of xanthan: A comprehensive exploration of biosynthesis, production, and diverse applications. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 46, pp. 771–787. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00449-023-02870-9>.
- Rosalam, S., England, R. 2006. Review of xanthan gum production from unmodified starches by *Xanthomonas campestris* sp. *Enzyme and Microbial Technology*, 39(2), pp. 197–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.10.019>.
- Savvides, A. L., Katsifas, E. A., Hatzinikolaou, D. G., Karagouni, A. D. 2012. Xanthan production by *Xanthomonas campestris* using whey permeate medium. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, pp. 2759–2764. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-012-1087-1>.
- Seviour, R. J., McNeil, B., Fazenda, M. L., Harvey, L. M. 2011. Operating bioreactors for microbial exopolysaccharide production. *Critical Reviews in Biotechnology*, 31(2), pp. 170–185. DOI: <https://doi.org/10.3109/07388551.2010.505909>.
- Shamala, T. R., Prasad, M. S. 2001. Fed-batch fermentation for rapid production of xanthan by *Xanthomonas campestris*. *Food Biotechnology*, 15(3), pp. 169–177. DOI: <https://doi.org/10.1081/FSB-100107628>.
- Silva, M. F., Fornari, R. C. G., Mazutti, M. A., de Oliveira, D. et al. 2009. Production and characterization of xanthan gum by *Xanthomonas campestris* using cheese whey as sole carbon source. *Journal of Food Engineering*, 90(1), pp. 119–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.010>.
- Song, Z., Ling, P., Zang, H., Li, L. et al. 2015. Development, validation and influence factor analysis of a near-infrared method for the molecular weight determination of xanthan gum. *Carbohydrate Polymers*, 115, pp. 582–588. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.079>.
- Souw, P., Demain, A. L. 1979. Nutritional studies on xanthan production by *Xanthomonas campestris* NRRL B1459. *Applied and Environmental Microbiology*, 37, pp. 1186–1192. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.37.6.1186-1192.1979>.
- Sujithra, B., Deepika, S., Akshaya, K., Ponnusami, V. 2019. Production and optimization of xanthan gum from three-step sequential enzyme treated cassava bagasse hydrolysate. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 21. Article number: 101294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101294>.
- Woiciechowski, A. L., Soccol, C. R., Rocha, S. N., Pandey, A. 2004. Xanthan gum production from cassava bagasse hydrolysate with *Xanthomonas campestris* using alternative sources of nitrogen. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 118, pp. 305–312. DOI: <https://doi.org/10.1385/ABAB:118:1-3:305>.
- Wu, M., Qu, J., Shen, Y., Dai, X. et al. 2019. Gel properties of xanthan containing a single repeating unit with saturated pyruvate produced by an engineered *Xanthomonas campestris* CGMCC 15155. *Food Hydrocolloids*, 87, pp. 747–757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.09.002>.
- Yoo, S. D., Harcum, S. W. 1999. Xanthan gum production from waste sugar beet pulp. *Bioresource Technology*, 70(1), pp. 105–109. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00013-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00013-9).

Сведения об авторах

Ямашев Тимур Анварович – ул. К. Маркса, 68, г. Казань, Россия, 420015;
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
канд. техн. наук, доцент;
e-mail: YamashevTA@corp.knrtu.ru, yamashev555@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-7924>

Timur A. Yamashev – 68 Karl Marx Str., Kazan, Russia, 420015;
Kazan National Research Technological University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: YamashevTA@corp.knrtu.ru, yamashev555@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-7924>

Хусайнов Инназар Асхадович – ул. К. Маркса, 68, г. Казань, Россия, 420015;
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
канд. техн. наук, ст. преподаватель;
e-mail: KhusainovIA@corp.knrtu.ru, fortes16@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8484-9117>

Innazar A. Khusainov – 68 Karl Marx Str., Kazan, Russia, 420015;
Kazan National Research Technological University, Cand. Sci. (Engineering), Senior Lecturer;
e-mail: KhusainovIA@corp.knrtu.ru, fortes16@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8484-9117>

Кручина-Богданов Игорь Вадимович – Институтский переулок, 5, г. Санкт-Петербург, Россия, 194021;
ООО "АМТ", канд. хим. наук;
e-mail: igogo011@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5779-5404>

Igor V. Kruchina-Bogdanov – 5B Institutskiy Lane, St. Petersburg, Russia, 194021;
AMT, Ltd., Sci. Cand. (Chemistry);
e-mail: igogo011@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5779-5404>

Наумов Игорь Александрович – Московский пр., 26, г. Санкт-Петербург, Россия, 190013;
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), ассистент;
e-mail: prof.naumov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7895-2235>

Igor A. Naumov – 26 Moskovski Ave., St. Petersburg, Russia, 190013;
St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Assistant;
e-mail: prof.naumov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7895-2235>

Канарский Альберт Владимирович – ул. К. Маркса, 68, г. Казань, Россия, 420015;
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
д-р техн. наук, профессор;
e-mail: KanarskiyAV@corp.knrtu.ru, alb46@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>

Albert V. Kanarsky – 68 Karl Marx Str., Kazan, Russia, 420015;
Kazan National Research Technological University, Dr. Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: KanarskiyAV@corp.knrtu.ru, alb46@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-2588>

УДК 664:633.8

Комплексная переработка растительного сырья Сибири в продукты функционального назначения

Н. А. Величко, Е. А. Рыгалова*, Я. В. Смольникова, Л. П. Шароглазова

**Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск, Россия;*

e-mail: x3x3x@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4730-4015>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
11.03.2026;

получена
после доработки
29.05.2026;

принята
к публикации
25.06.2026

Ключевые слова:

комплексная
переработка,
плодово-ягодное сырье,
хвойный гидролат,
ферментные
препараты,
сокосодержащие
и безалкогольные
напитки

Для цитирования

Для пищевой и перерабатывающей отрасли сохраняет значимость разработка ресурсосберегающих технологий, позволяющих вовлекать в переработку плодово-ягодное и другое растительное сырье Сибири с максимальным сохранением биологически ценных компонентов. Предложена комплексная схема переработки сырья, характерного для агроэкологических условий Красноярского края: черноплодной рябины, шиповника, костяники каменистой, голубики, черники, брусники, рябины обыкновенной, боярышника, мелкоплодных яблочек, крыжовника, черемухи и других культур. Технологический подход основан на сочетании механической подготовки, ферментативной обработки мезги, прессования, фильтрации и сублимационной сушки. Показано, что применение мультиэнзимной композиции повышает выход соковой фракции на 15–18 %. Наибольший выход сока получен из рябины обыкновенной после бланширования горячей водой при гидромодуле 1 : 1 (82,40 %), минимальные потери для этого варианта составили 3,60 %. Для сокосодержащих напитков на основе соков малины и костяники каменистой наилучшие органолептические показатели установлены для рецептуры с кедровым хвойным экстрактом; готовый напиток характеризовался кислотностью $4,03 \pm 0,04$ ед., содержанием сухих веществ $8,60 \pm 0,20$ %, аскорбиновой кислоты $9,90 \pm 0,02$ мг%, флавоноидов $98,89 \pm 0,10$ мг% и антоцианов $5,34 \pm 0,10$ мг%. Комплексная переработка позволяет получать ягодные соки, сокосодержащие безалкогольные напитки с нетрадиционными превантерами, антоциановые красители, порошок сублимированного сока и порошок из выжимок для применения в хлебобулочных, кондитерских, мясных и других пищевых изделиях.

Величко Н. А. и др. Комплексная переработка растительного сырья Сибири в продукты функционального назначения. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 393–402. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-393-402>.

Integrated processing of Siberian plant raw materials into functional products

Nadezhda A. Velichko, Elizaveta A. Rygalova*, Yana V. Smolnikova, Lidia P. Sharoglazova

**Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia;*

e-mail: x3x3x@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4730-4015>

Article info

Received
11.03.2026;

received
in revised form
29.05.2026;

accepted
25.06.2026

Key words:

integrated processing,
fruit and berry raw
materials,
coniferous hydrolate,
enzymes,
juice-based beverages

For citation

Abstract

The food processing industry needs resource-saving technologies for the integrated processing of Siberian fruit-and-berry and other plant raw materials while preserving biologically valuable components. The paper presents an integrated processing scheme for raw materials typical of Krasnoyarsk Krai, including chokeberry, rosehip, stone bramble, blueberry, bilberry, lingonberry, rowan, hawthorn, small-fruited apples, gooseberry, bird cherry and other species. The technological approach combines mechanical preparation, enzymatic treatment of mash, pressing, filtration and freeze-drying. The use of a multienzyme composition increases juice yield by 15–18 %. The highest juice yield has been obtained from rowan after blanching with hot water at a 1 : 1 hydromodule (82.40 %), with losses of 3.60 %. For juice-based soft drinks made from raspberry and stone bramble juices, the best sensory score has been achieved by the formulation with cedar coniferous extract; the finished drink has acidity of 4.03 ± 0.04 units, soluble solids of 8.60 ± 0.20 %, ascorbic acid of 9.90 ± 0.02 mg%, flavonoids of 98.89 ± 0.10 mg%, and anthocyanins of 5.34 ± 0.10 mg%. The integrated scheme makes it possible to obtain berry juice, juice-based soft drinks with non-traditional chemopreventive additives, anthocyanin colorants, freeze-dried juice powder, and pomace powder for bakery, confectionery, meat and other food formulations.

Velichko, N. A. et al. 2026. Integrated processing of Siberian plant raw materials into functional products. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 393–402. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-393-402>.

Введение

Красноярский край занимает 2 366 797 км², а его протяженность достигает примерно 2 886 км. На территории региона представлены почти все основные природно-ландшафтные зоны России: от арктических пустынь и тундры до различных подзон тайги, лесостепи и степи. Такое природное разнообразие формирует широкую сырьевую базу плодово-ягодных и других растительных ресурсов, включая как культурные, так и дикорастущие виды.

Повышение эффективности переработки плодово-ягодного сырья в регионе связано не только с модернизацией действующих процессов, но и с разработкой новых приемов хранения и переработки, в том числе с вовлечением традиционных и недостаточно изученных видов сырья (*Struck et al., 2016; Reißner et al., 2019; Quiles et al., 2018; Sagar et al., 2018; Kitrytė et al., 2020; Díez-Sánchez et al., 2023; Jurevičiūtė et al., 2022; Piasecka et al., 2022*). Для этого необходимы системные исследования химического состава дикорастущих ресурсов, на основе которых можно проектировать конкурентоспособные продукты и технологические решения (*Syrpas et al., 2021; Pires et al., 2021; Jurendić et al., 2021; Brglez Mojzer et al., 2016; Khoo et al., 2017*). Современные технологии щадящей переработки растительного сырья ориентированы на повышение извлечения биологически активных веществ за счет ферментативной обработки, применения зеленых растворителей, ультразвуковой и микроволновой экстракции (*Gligor et al., 2019; Chemat et al., 2019; Albuquerque et al., 2017; Barba et al., 2016*).

На кафедре технологии консервирования и пищевой биотехнологии Института пищевых производств ФГБОУ ВО "Красноярский государственный аграрный университет" разработан ряд рецептур и безотходных технологий переработки плодово-ягодного и растительного сырья в продукты, обогащенные функционально значимыми веществами; по части решений получены патенты Российской Федерации (*Способ..., 2017; Безалкогольный..., 2017б; Безалкогольный..., 2017в; Безалкогольный..., 2017а; Способ..., 2020*).

Материалы и методы

Цель исследования состояла в разработке безотходной технологии переработки плодово-ягодного сырья с учетом особенностей его механического строения и химического состава.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

- расширить перечень и объемы региональных сырьевых источников, пригодных для получения пищевых продуктов, содержащих функционально значимые компоненты;
- разработать и предложить к внедрению новые рецептуры и технологические решения для пищевой продукции.

Объектами исследования служили плоды черноплодной рябины, шиповника, костяники каменистой, голубики, черники, брусники, рябины обыкновенной, боярышника, мелкоплодных яблок, крыжовника и черемухи обыкновенной, собранные в Красноярском крае в 2017–2019 гг. в фазе технологической зрелости.

Для решения поставленных задач использовали совокупность органолептических и физико-химических методов оценки как исходного сырья, так и готовой продукции.

Органолептическую оценку выполняли дегустационным методом (*Chemat et al., 2019; Albuquerque et al., 2017*). Массовую долю сухих веществ в ягодах и напитках на их основе определяли рефрактометрическим методом (*Barba et al., 2016*). Кислотность готовых напитков устанавливали титриметрически (*Способ..., 2017*). Содержание аскорбиновой кислоты определяли йодометрически (*Безалкогольный..., 2017в*). Экстрактивность растительного сырья и содержание дубильных веществ (в пересчете на танин) оценивали по стандартной методике (*Безалкогольный..., 2017б*). Количество антоцианов и фенольных соединений определяли спектрофотометрически (*Безалкогольный..., 2017а*).

Ферментативную обработку мезги проводили при температуре 45 °С с последующей инактивацией ферментов нагревом до 70 °С. В качестве пектолитического препарата использовали VINOFORM zymex, обеспечивающий расщепление пектиновых веществ клеточных стенок; в качестве целлюлолитического препарата – БРЮЗЗАЙМ BGX, ориентированный на деструкцию целлюлозо-гемицеллюлозного комплекса; для комплексного воздействия применяли мультиэнзимную композицию (МЭК). Препараты вносили в виде водных растворов; дозировку выражали в процентах к массе мезги, а продолжительность выдержки – в минутах. По результатам подбора режимов использовали следующие параметры: VINOFORM zymex – 0,03 % к массе мезги; БРЮЗЗАЙМ BGX – 0,05 % к массе мезги; МЭК – 0,08 % к массе мезги. Продолжительность ферментативной обработки составляла 60 мин.

Статистическую обработку результатов выполняли по данным повторных определений с расчетом среднего значения, ошибки среднего и коэффициента вариации. Достоверность различий между вариантами ферментативной обработки, а также между рецептурами напитков оценивали с применением дисперсионного анализа и критерия Стьюдента; различия считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$. Все определения проводили в трехкратной повторности ($n = 3$); результаты представляли в виде $M \pm m$. Повышение выхода

сока при применении мультинзимной композиции относительно контрольной обработки было статистически значимым ($p = 0,012$). Уровень значимости различий органолептической оценки рецептуры 1 по сравнению с рецептурами 2, 3, 4 и 5 составил соответственно $p = 0,031$; $p = 0,018$; $p = 0,009$ и $p = 0,015$.

Результаты

Комплексная переработка ягодного сырья, характерного для агроэкологических условий Красноярского края, предусматривает получение нескольких видов продукции: ягодного сока, сокосодержащих напитков на его основе, алкогольных напитков, антоциановых красителей, сублимированного порошка сока, а также порошка из выжимок, который далее может применяться в хлебобулочных, кондитерских, мясных и других изделиях.

Авторами предложена принципиальная схема комплексной переработки дикорастущего ягодного сырья, ориентированная на максимально полное использование всех компонентов сырья (рис. 1).

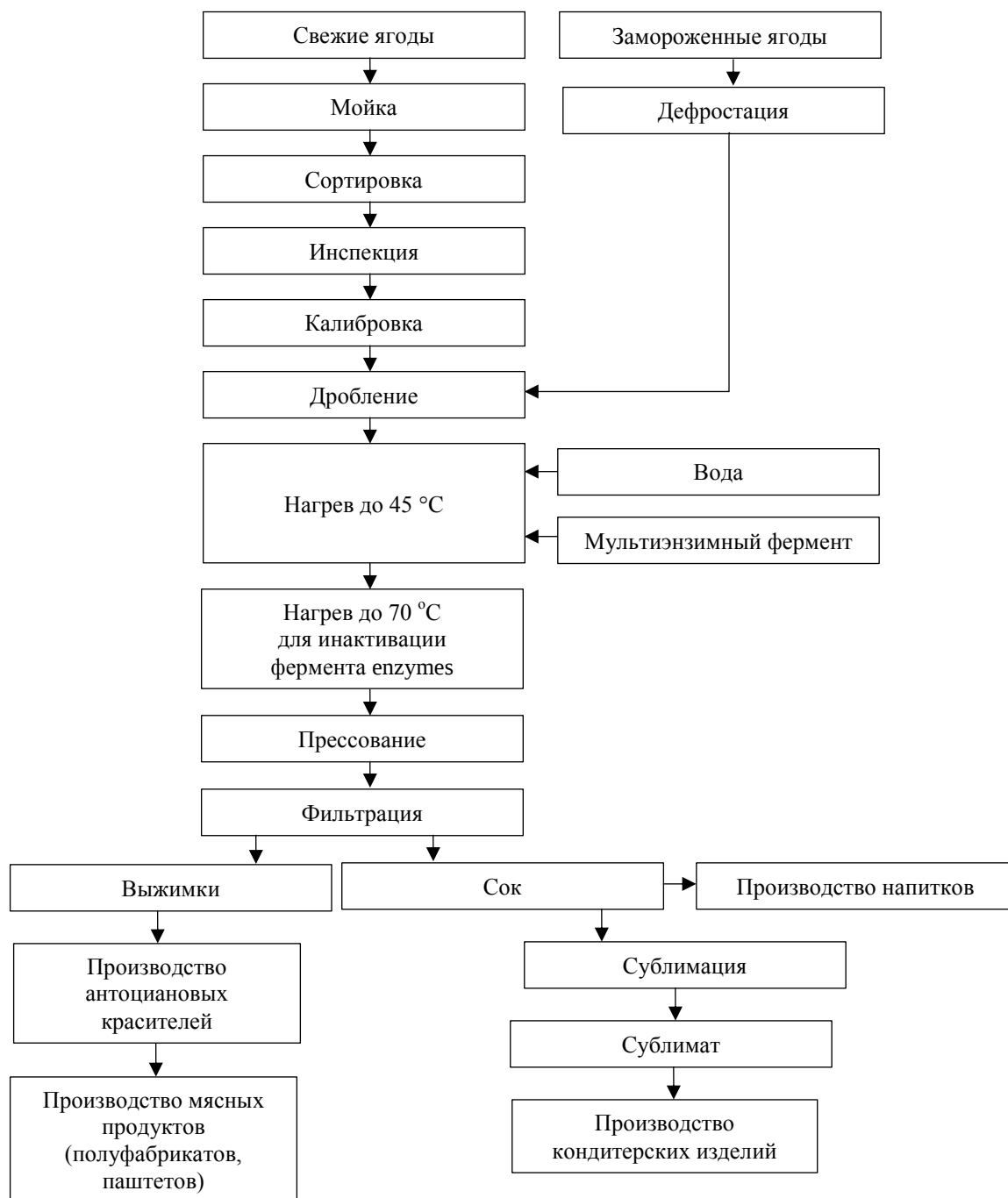


Рис. 1. Принципиальная схема комплексной переработки ягодного сырья
Fig. 1. Principal scheme of integrated berry raw material processing

После отделения соковой фракции полученный ягодный сок направляли на сублимационную сушку для получения порошкообразного продукта. Такой порошок хорошо растворяется в воде, удобен в хранении и транспортировании (не требует значительных складских площадей) и может использоваться для приготовления напитков, а также для внесения в готовые пищевые продукты, в том числе в бытовых условиях. Применение сублимационной сушки для получения стабильных порошкообразных ягодных компонентов и природных красителей согласуется с подходами, описанными для дикорастущих ягодных экстрактов (Gomez Mattson *et al.*, 2022).

После отделения сока образуется значительное количество ягодных выжимок. Для исключения неоднозначного толкования результаты выхода сока представлены с указанием способа подготовки сырья. Показатели рассчитаны от массы подготовленного сырья, поступившего на прессование; сублимированные порошки и сухие фракции получали на последующих стадиях и в расчет выхода соковой фракции не включали (табл. 1).

Таблица 1. Выход ягодного сока, выжимок и потери с учетом способа подготовки сырья
(средние значения, $n = 3$)

Table 1. Yield of berry juice, pomace and losses depending on raw material preparation method
(mean values, $n = 3$)

Наименование образца и способ подготовки	Выход сока, %	Выжимки, %	Потери, %
Боярышник, свежие плоды; бланширование горячей водой, гидромодуль 1 : 1	47,00	46,00	7,00
Рябина обыкновенная, свежие плоды; бланширование горячей водой, гидромодуль 1 : 1	82,40	14,00	3,60
Голубика, подготовленные ягоды; без добавления воды	59,45	34,50	6,05
Черника, подготовленные ягоды; без добавления воды	62,87	24,09	13,03
Брусника, подготовленные ягоды; без добавления воды	65,19	29,61	5,20
Черноплодная рябина, свежие плоды; бланширование горячей водой, гидромодуль 1 : 1	48,88	41,93	9,19
Костяника каменистая, подготовленные ягоды; без добавления воды	62,56	27,92	9,52
Малина, подготовленные ягоды; без добавления воды	65,69	25,00	9,31
Морошка приземистая, подготовленные ягоды; без добавления воды	63,18	27,70	9,12
Черемуха, подготовленные ягоды; без добавления воды	48,76	42,68	8,56

Гидромодуль 1 : 1 с горячей водой использовали только для сырья с плотной тканевой структурой, повышенной вязкостью мякоти или выраженной терпкостью, поскольку предварительное бланширование облегчает разрушение клеточных стенок, снижает вязкость соковой фракции и улучшает условия прессования. Для сочных ягод с достаточным собственным сокоотделением дополнительное разбавление не применяли, чтобы не снижать массовую долю растворимых сухих веществ и интенсивность окраски.

Для повышения выхода ягодного сока использовали ферментные препараты пектолитического действия (VINOFORM zymex), целлюлолитического действия (БЮЗЗАЙМ BGX), а также мультиэнзимную композицию (МЭК) (табл. 2). Наибольший технологический эффект обеспечивала МЭК: выход сока возрастал на 15–18 % относительно контроля без ферментативной обработки, что связано с одновременной деструкцией пектиновых и целлюлозосодержащих компонентов клеточных стенок.

Одним из перспективных направлений расширения ассортимента являются безалкогольные напитки, содержащие функционально значимые компоненты. Несмотря на насыщенность рынка, доля продуктов с выраженной функциональной направленностью остается ограниченной, особенно в сегменте напитков с нетрадиционными хемиопревантами, позволяющими формировать композиции с заданными свойствами для разных групп потребителей.

Таблица 2. Характеристика ферментных препаратов, использованных для обработки мезги
Table 2. Characteristics of enzyme preparations used for mash treatment

Препарат	Основное действие	Целевая фракция сырья	Количество / режим внесения	Технологический эффект
VINOFORM zymex	Пектолитическое	Пектиновые вещества клеточных стенок	0,03 % к массе мезги; 45 °C; 60 мин	Снижение вязкости мезги, облегчение сокоотделения
БРЮЗЗАЙМ BGX	Целлюлолитическое	Целлюлозо-гемицеллюлозный комплекс	0,05 % к массе мезги; 45 °C; 60 мин	Разрыхление структуры ткани, повышение выхода жидкой фракции
Мультиэнзимная композиция (МЭК)	Комплексное пектолитическое и целлюлолитическое воздействие	Пектиновые и целлюлозосодержащие компоненты	0,08 % к массе мезги; 45 °C; 60 мин	Увеличение выхода сока на 15–18 % относительно контроля

В Красноярском крае широко распространены хвойные породы (сосна, пихта, кедр, ель), которые в основном рассматриваются как древесное сырье. При этом древесная зелень составляет в среднем 16–20 % массы дерева, однако ее переработка в регионе пока развита недостаточно. Пихтовые, сосновые и кедровые экстракты, а также хвойный гидролат были получены и предоставлены ООО "Инновационные лесные технологии" (Красноярский край).

Водные экстракты древесной зелени содержат экстрактивные вещества, жирные кислоты, минеральные компоненты, фенольные соединения, витамины группы В, аскорбиновую кислоту и другие физиологически значимые вещества (Снособ..., 2020). Более широкое использование таких экстрактов в пищевых технологиях ограничивается специфическим вкусом, особенностями окраски и недостаточной изученностью их влияния на качество готовой продукции.

В рецептурах использовали не спиртовой дистиллят, получаемый при перегонке сахаросодержащих продуктов, а хвойный гидролат – водную конденсатную фракцию пароводяной обработки древесной зелени. Поэтому в тексте и рецептурной таблице термин "дистиллят" заменен на "гидролат", что точнее отражает природу введенного ингредиента и исключает неоднозначность при оценке безалкогольных напитков.

Для расширения ассортимента безалкогольных напитков, повышения их пищевой ценности и формирования новых сенсорных характеристик были разработаны рецептуры на основе ягодных соков с добавлением хвойных водных экстрактов и гидролата.

Для каждого варианта подбирали дозировки ингредиентов, обеспечивающие наилучшее качество продукции и гармоничный вкус.

Составы безалкогольных напитков на основе ягодных соков с добавлением кедрового и пихтового хвойных экстрактов, хвойного гидролата и настоя конопли посевной представлены в табл. 3.

Таблица 3. Рецептуры безалкогольных напитков на основе ягодного сока, хвойных экстрактов/гидролата и настоя конопли посевной (на 1 000 л)
Table 3. Formulations of non-alcoholic beverages based on berry juice, coniferous extracts/hydrolate and hemp infusion (per 1,000 L)

Наименование ингредиента	Рецептура 1	Рецептура 2	Рецептура 3	Рецептура 4	Рецептура 5
Сок ягод малины, л	250	250	250	250	250
Сок ягод костяники каменистой, л	250	250	250	250	250
Сахар, кг	65	65	65	65	65
Экстракт хвойный кедровый, л	30	–	–	–	10
Экстракт хвойный пихтовый, л	–	30	–	–	–
Гидролат хвойный пихтовый, л	–	–	50	–	40
Настой соцветий конопли посевной	–	–	–	70	–
Вода, л	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное

Профилограмма органолептических свойств разработанных напитков приведена на рис. 2. По суммарной оценке сенсорных показателей наилучшим был признан сокосодержащий напиток по рецептуре 1.

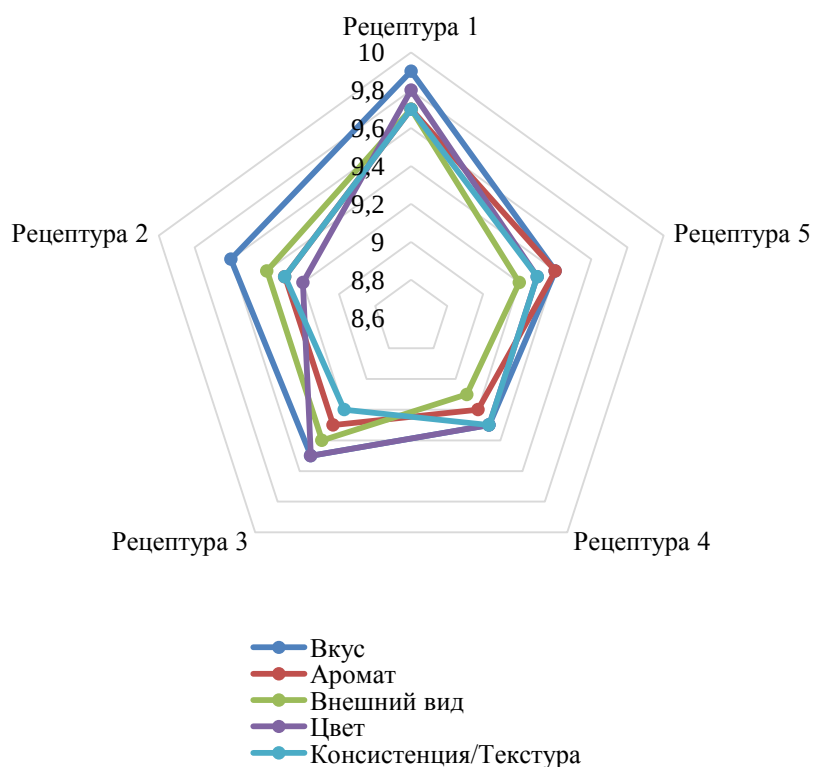


Рис. 2. Профилограмма органолептических показателей разработанных напитков

Fig. 2. Sensory profile of the developed beverages

Физико-химические характеристики напитка, получившего лучшую органолептическую оценку (на основе сока костяники каменистой и малины с добавлением кедрового хвойного экстракта), приведены в табл. 4. Значения представлены как среднее значение с ошибкой среднего ($M \pm m$, $n = 3$).

Таблица 4. Физико-химические показатели сокосодержащего напитка ($M \pm m$, $n = 3$)

Table 4. Physicochemical parameters of the juice-containing beverage ($M \pm m$, $n = 3$)

Наименование компонентов	Значение показателя
Кислотность, ед.	4,03 ± 0,04
Содержание сухих веществ, %	8,60 ± 0,20
Аскорбиновая кислота, мг%	9,90 ± 0,02
Витамин Р, мг%	5,90 ± 0,20
Дубильные вещества, %	0,12 ± 0,10
Флавоноиды, мг%	98,89 ± 0,10
Антоцианы, мг%	5,34 ± 0,10

Дополнительно были проведены исследования по обоснованию срока годности разработанных напитков.

Статистическая обработка данных подтвердила достоверность различий по ключевым сравнениям: контроль / ферментативная обработка мезги ($p = 0,012$), рецептура 1 / рецептуры 2–5 ($p \leq 0,031$). Коэффициент вариации по повторным определениям физико-химических показателей не превышал 5,0 %, что свидетельствует о воспроизводимости полученных данных.

Установлено, что при соблюдении условий хранения (температура 18 ± 2 °C, относительная влажность воздуха 70 ± 5 %) срок годности безалкогольных сокосодержащих напитков составляет 6 месяцев.

Обсуждение

По данным табл. 1 наибольший выход сока (82,40 %) получен из ягод рябины обыкновенной после бланширования горячей водой при гидромодуле 1 : 1; для этого же варианта зафиксированы минимальные потери (3,60 %). Наименьший выход сока (47,00 %) отмечен у боярышника, что связано с более плотной структурой плодов и высокой долей нерастворимых фракций. Максимальная доля выжимок характерна

для боярышника (46,00 %) и черноплодной рябины (41,93 %), минимальная – для рябины обыкновенной после бланширования (14,00 %). Полученные различия подтверждают необходимость дифференцированного выбора предварительной обработки сырья: для плотных плодов целесообразно применять бланширование и ферментативную подготовку, а для сочных ягод – прямое прессование без разбавления.

Для расширения ассортимента безалкогольной продукции предложены рецептуры напитков на основе ягодных соков с добавлением кедрового и пихтового водных экстрактов, хвойного гидролата и настоя конопли посевной. Использование хвойных ингредиентов позволяет формировать специфический ароматический профиль и повышать содержание биологически активных соединений, однако требует ограничения дозировок из-за выраженного вкуса и аромата древесной зелени.

Показатели качества разработанного сокосодержащего напитка соответствуют действующим нормативным требованиям. Рецепт 1 получила наиболее высокую суммарную органолептическую оценку за счет гармоничного сочетания ягодной основы и кедрового хвойного экстракта. Напиток характеризуется содержанием сухих веществ $8,60 \pm 0,20$ %, аскорбиновой кислоты $9,90 \pm 0,02$ мг%, флавоноидов $98,89 \pm 0,10$ мг% и антоцианов $5,34 \pm 0,10$ мг%, что позволяет рассматривать его как продукт функциональной направленности. Потребление 500 мл напитка обеспечивает существенный вклад в суточное поступление витамина С и флавоноидов. Микробиологические показатели готового продукта соответствуют нормативу.

Сублимированный ягодный порошок из выжимок использовали в качестве ингредиента при разработке хлебобулочных, кондитерских и мясорастительных изделий. Для таких продуктов определены рациональные дозировки порошка, обеспечивающие оптимальные сенсорные и технологические характеристики готовой продукции (Quiles et al., 2018; Diez-Sánchez et al., 2023; Jurevičiūtė et al., 2022; Величко и др., 2018; Величко и др., 2019).

Заключение

Разработана комплексная схема переработки дикорастущего ягодного и растительного сырья Красноярского края, основанная на максимально полном использовании сырьевых фракций и позволяющая получать широкий ассортимент продуктов: ягодный сок, сокосодержащие напитки с добавлением нетрадиционных превантеров, антоциановые красители, порошок сублимированного сока и порошок из выжимок для включения в рецептуры хлебобулочных, кондитерских, мясных и других изделий. Уточнение способа подготовки сырья показало, что бланширование горячей водой при гидромодуле 1 : 1 целесообразно применять для плодов с плотной структурой и затрудненным сокоотделением, для сочных ягод дополнительное разбавление не требуется. Наибольший выход сока установлен для рябины обыкновенной (82,40 %), а наибольшая доля выжимок – для боярышника (46,00 %) и черноплодной рябины (41,93 %), что подтверждает перспективность дальнейшего использования этих выжимок как источника пищевых волокон и фенольных соединений. Ферментативная обработка мезги с применением мультиэнзимной композиции обеспечивает прирост выхода сока на 15–18 % относительно контроля и является технологически обоснованным этапом комплексной переработки. Среди разработанных рецептов безалкогольных напитков оптимальной признана рецептура 1 на основе соков малины и костяники каменистой с добавлением кедрового хвойного экстракта; готовый напиток характеризуется гармоничным органолептическим профилем, содержанием сухих веществ $8,60 \pm 0,20$ %, аскорбиновой кислоты $9,90 \pm 0,02$ мг%, флавоноидов $98,89 \pm 0,10$ мг% и антоцианов $5,34 \pm 0,10$ мг%. Полученные технологические решения внедрены на предприятиях ООО "Феникс-2016" и ООО "Инновационные лесные технологии".

Библиографический список

- Безалкогольный газированный напиток "Рубин" : пат. Рос. Федерация 2622922 / Н. А. Величко, Л. П. Шароглазова, З. Н. Берикашвили, Я. В. Смольникова. № 2016112820 ; заявл. 04.04.2016 ; опубл. 21.06.2017а, Бюл. № 18.
- Безалкогольный газированный напиток "Рубиновое солнце" : пат. Рос. Федерация 2624965 / Е. А. Рыгалова, Н. А. Величко, В. И. Терентьев, Л. П. Шароглазова и др. № 2016102207 ; заявл. 25.01.2016 ; опубл. 11.07.2017б, Бюл. № 20.
- Безалкогольный напиток "Костяничка" : пат. Рос. Федерация 2613286 / Е. А. Рыгалова, Н. А. Величко, Я. В. Смольникова, В. А. Шломина. № 2015146722 ; заявл. 29.10.2015 ; опубл. 15.03.2017в, Бюл. № 8.
- Величко Н. А., Клименок С. Н., Демина О. В. Возможность использования хвойных экстрактов в рецептурах настоек // Вестник КрасГАУ. 2018. № 4(139). С. 156–160. EDN: UWQHEK.
- Величко Н. А., Рыгалова Е. А., Гринюк О. Ю. Разработка технологии хлебобулочных изделий с ягодными выжимками костяники каменистой // Вестник КрасГАУ. 2019. № 4(145). С. 108–113. EDN: LQCAYW.
- Способ получения концентрата из ягод костяники каменистой : пат. Рос. Федерация 2716088 / Е. А. Рыгалова, Н. А. Величко, Я. В. Смольникова. № 2018106191 ; заявл. 19.02.2018 ; опубл. 05.03.2020, Бюл. № 23.
- Способ производства сока из сортов мелкоплодного яблока и ягод облепихи Восточной Сибири : пат. Рос. Федерация 2610311 / А. А. Беляев, Н. А. Величко, Н. И. Авдиенко. № 2015139776 ; заявл. 18.09.2015 ; опубл. 09.02.2017, Бюл. № 4.

- Albuquerque B. R., Prieto M. A., Barreiro M. F., Rodrigues A. [et al.]. Catechin-based extract optimization obtained from *Arbutus unedo* L. fruits using maceration/microwave/ultrasound extraction techniques // *Industrial Crops and Products*. 2017. Vol. 95. P. 404–415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.050>.
- Barba F. J., Zhu Z., Koubaa M., Sant'Ana A. S. [et al.]. Green alternative methods for the extraction of antioxidant bioactive compounds from winery wastes and by-products: A review // *Trends in Food Science & Technology*. 2016. Vol. 49. P. 96–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.006>.
- Brglez Mojzer E., Knez Hrnčič M., Škerget M., Knez Ž. [et al.]. Polyphenols: Extraction methods, antioxidative action, bioavailability and anticarcinogenic effects // *Molecules*. 2016. Vol. 21, Iss. 7. Article number: 901. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules21070901>.
- Chemat F., Abert Vian M., Ravi H. K., Khadhraoui B. [et al.]. Review of alternative solvents for green extraction of food and natural products: Panorama, principles, applications and prospects // *Molecules*. 2019. Vol. 24, Iss. 16. Article number: 3007. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24163007>.
- Diez-Sánchez E., Quiles A., Hernando I. Use of berry pomace to design functional foods // *Food Reviews International*. 2023. Vol. 39, Iss. 6. P. 3204–3224. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2010217>.
- Gligor O., Mocan A., Moldovan C., Locatelli M. [et al.]. Enzyme-assisted extractions of polyphenols – A comprehensive review // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 88. P. 302–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.029>.
- Gomez Mattson M., Sozzi A., Corfield R., Gagneten M. [et al.]. Colorant and antioxidant properties of freeze-dried extracts from wild berries: Use of ultrasound-assisted extraction method and drivers of liking of colored yogurts // *Journal of Food Science and Technology*. 2022. Vol. 59. P. 944–955. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05096-3>.
- Jurendić T., Ščetar M. *Aronia melanocarpa* products and by-products for health and nutrition: A review // *Antioxidants*. 2021. Vol. 10, Iss. 7. Article number: 1052. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox10071052>.
- Jurevičiūtė I., Keršienė M., Bašinskienė L., Leskauskaitė D. [et al.]. Characterization of berry pomace powders as dietary fiber-rich food ingredients with functional properties // *Foods*. 2022. Vol. 11, Iss. 5. Article number: 716. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11050716>.
- Khoo H. E., Azlan A., Tang S. T., Lim S. M. Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits // *Food & Nutrition Research*. 2017. Vol. 61. Article number: 1361779. DOI: <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779779>.
- Kitrytė V., Kavaliauskaitė A., Tamkutė L., Pukalskienė M. [et al.]. Zero waste biorefining of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) pomace into functional ingredients by consecutive high pressure and enzyme assisted extractions with green solvents // *Food Chemistry*. 2020. Vol. 322. Article number: 126767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126767>.
- Piasecka I., Wiktor A., Górka A. Alternative methods of bioactive compounds and oils extraction from berry fruit by-products – A review // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Iss. 3. Article number: 1734. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031734>.
- Pires T. C. S. P., Dias M. I., Calhelha R. C., Alves M. J. [et al.]. Development of new bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) based snacks: Nutritional, chemical and bioactive features // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 334. Article number: 127511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127511>.
- Quiles A., Llorca E., Schmidt C., Reißner A.-M. [et al.]. Use of berry pomace to replace flour, fat or sugar in cakes // *International Journal of Food Science and Technology*. 2018. Vol. 53, Iss. 6. P. 1579–1587. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13765>.
- Reißner A.-M., Al-Hamimi S., Quiles A., Schmidt C. [et al.]. Composition and physicochemical properties of dried berry pomace // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2019. Vol. 99, Iss. 3. P. 1284–1293. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9302>.
- Sagar N. A., Pareek S., Sharma S., Yahia E. M. [et al.]. Fruit and vegetable waste: Bioactive compounds, their extraction, and possible utilization // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2018. Vol. 17, Iss. 3. P. 512–531. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>.
- Struck S., Plaza M., Turner C., Rohm H. Berry pomace – a review of processing and chemical analysis of its polyphenols // *International Journal of Food Science and Technology*. 2016. Vol. 51, Iss. 6. P. 1305–1318. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13112>.
- Syrpas M., Valanciene E., Augustiniene E., Malys N. Valorization of bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) pomace by enzyme-assisted extraction: Process optimization and comparison with conventional solid-liquid extraction // *Antioxidants*. 2021. Vol. 10, Iss. 5. Article number: 773. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox10050773>.

References

- Velichko, N. A., Sharoglavova, L. P., Berikashvili, Z. N., Smolnikova, Ya. V. 2017a. Soft drink "Ruby", Russian Federation, Pat. 2622922. (In Russ.)
- Rygalova, E. A., Velichko, N. A., Terent'ev, V. I., Sharoglavova, L. P. 2017b. Non-alcoholic carbonated drink "Ruby Sun", Russian Federation, Pat. 2624965. (In Russ.)

- Rygalova, E. A., Velichko, N. A., Smolnikova, Ya. V., Shlomina, V. A. 2017b. Non-alcoholic drink "Kostyanichka", Russian Federation, Pat. 2613286. (In Russ.)
- Velichko, N. A., Klimenok, S. N., Demina, O. V. 2018. Possibility of using coniferous extracts in tincture formulations. *Bulletin of KSAU*, 4(139), pp. 156–160. EDN: UWQHEK. (In Russ.)
- Velichko, N. A., Rygalova, E. A., Grinyuk, O. Yu. 2019. Development of bakery technology using stone bramble berry pomace. *Bulletin of KSAU*, 4(145), pp. 108–113. EDN: LQCAYW. (In Russ.)
- Rygalova, E. A., Velichko, N. A., Smolnikova, Ya. V. 2020. Method for obtaining concentrate from stone bramble berries, Russian Federation, Pat. 2716088. (In Russ.)
- Belyaev, A. A., Velichko, N. A., Avdienko, N. I. 2017. A method for producing juice from small-fruited apple varieties and sea buckthorn berries from Eastern Siberia, Russian Federation, Pat. 2610311. (In Russ.)
- Albuquerque, B. R., Prieto, M. A., Barreiro, M. F., Rodrigues, A. et al. 2017. Catechin-based extract optimization obtained from *Arbutus unedo* L. fruits using maceration/microwave/ultrasound extraction techniques. *Industrial Crops and Products*, 95, pp. 404–415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.050>.
- Barba, F. J., Zhu, Z., Koubaa, M., Sant'Ana, A. S. et al. 2016. Green alternative methods for the extraction of antioxidant bioactive compounds from winery wastes and by-products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 49, pp. 96–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.006>.
- Brglez Mojzer, E., Knez Hrnčič, M., Škerget, M., Knez, Ž. et al. 2016. Polyphenols: Extraction methods, antioxidative action, bioavailability and anticarcinogenic effects. *Molecules*, 21(7). Article number: 901. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules21070901>.
- Chemat, F., Abert Vian, M., Ravi, H. K., Khadhraoui, B. et al. 2019. Review of alternative solvents for green extraction of food and natural products: Panorama, principles, applications and prospects. *Molecules*, 24(16). Article number: 3007. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24163007>.
- Díez-Sánchez, E., Quiles, A., Hernando, I. 2023. Use of berry pomace to design functional foods. *Food Reviews International*, 39(6), pp. 3204–3224. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2010217>.
- Gligor, O., Mocan, A., Moldovan, C., Locatelli, M. et al. 2019. Enzyme-assisted extractions of polyphenols – A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 88, pp. 302–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.029>.
- Gomez Mattson, M., Sozzi, A., Corfield, R., Gagneten, M. et al. 2022. Colorant and antioxidant properties of freeze-dried extracts from wild berries: Use of ultrasound-assisted extraction method and drivers of liking of colored yogurts. *Journal of Food Science and Technology*, 59, pp. 944–955. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05096-3>.
- Jurendić, T., Ščetar, M. 2021. *Aronia melanocarpa* products and by-products for health and nutrition: A review. *Antioxidants*, 10(7). Article number: 1052. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox10071052>.
- Jurevičiūtė, I., Keršienė, M., Bašinskienė, L., Leskauskaitė, D. et al. 2022. Characterization of berry pomace powders as dietary fiber-rich food ingredients with functional properties. *Foods*, 11(5). Article number: 716. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11050716>.
- Khoo, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., Lim, S. M. 2017. Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food & Nutrition Research*, 61. Article number: 1361779. DOI: <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779779>.
- Kitrytė, V., Kavaliauskaitė, A., Tamkutė, L., Pukalskienė, M. et al. 2020. Zero waste biorefining of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) pomace into functional ingredients by consecutive high pressure and enzyme assisted extractions with green solvents. *Food Chemistry*, 322. Article number: 126767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126767>.
- Piasecka, I., Wiktor, A., Górka, A. 2022. Alternative methods of bioactive compounds and oils extraction from berry fruit by-products – A review. *Applied Sciences*, 12(3). Article number: 1734. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031734>.
- Pires, T. C. S. P., Dias, M. I., Calhella, R. C., Alves, M. J. et al. 2021. Development of new bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) based snacks: Nutritional, chemical and bioactive features. *Food Chemistry*, 334. Article number: 127511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127511>.
- Quiles, A., Llorca, E., Schmidt, C., Reißner, A.-M. et al. 2018. Use of berry pomace to replace flour, fat or sugar in cakes. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(6), pp. 1579–1587. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13765>.
- Reißner, A.-M., Al-Hamimi, S., Quiles, A., Schmidt, C. et al. 2019. Composition and physicochemical properties of dried berry pomace. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), pp. 1284–1293. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9302>.
- Sagar, N. A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E. M. et al. 2018. Fruit and vegetable waste: Bioactive compounds, their extraction, and possible. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(3), pp. 512–531. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>.

- Struck, S., Plaza, M., Turner, C., Rohm, H. 2016. Berry pomace – a review of processing and chemical analysis of its polyphenols. *International Journal of Food Science and Technology*, 51(6), pp. 1305–1318. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13112>.
- Syrpas, M., Valanciene, E., Augustiniene, E., Malys, N. 2021. Valorization of bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) pomace by enzyme-assisted extraction: Process optimization and comparison with conventional solid-liquid extraction. *Antioxidants*, 10(5). Article number: 773. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox10050773>.

Сведения об авторах

Величко Надежда Александровна – пр. Мира, 90, г. Красноярск, Россия, 660049;
Красноярский государственный аграрный университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: vena@kgau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4743-5573>

Nadezhda A. Velichko – 90 Mira Ave., Krasnoyarsk, Russia, 660049;
Krasnoyarsk State Agrarian University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: vena@kgau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4743-5573>

Рыгалова Елизавета Александровна – пр. Мира, 90, г. Красноярск, Россия, 660049;
Красноярский государственный аграрный университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: x3x3x@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4730-4015>

Elizaveta A. Rygalova – 90 Mira Ave., Krasnoyarsk, Russia, 660049;
Krasnoyarsk State Agrarian University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: x3x3x@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4730-4015>

Смольникова Яна Викторовна – пр. Мира, 90, г. Красноярск, Россия, 660049;
Красноярский государственный аграрный университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: ya104@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8709-3822>

Yana V. Smolnikova – 90 Mira Ave., Krasnoyarsk, Russia, 660049;
Krasnoyarsk State Agrarian University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: ya104@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8709-3822>

Шароглазова Лидия Петровна – пр. Мира, 90, г. Красноярск, Россия, 660049;
Красноярский государственный аграрный университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: lpsh2010@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3412-3714>

Lidia P. Sharoglazova – 90 Mira Ave., Krasnoyarsk, Russia, 660049;
Krasnoyarsk State Agrarian University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: lpsh2010@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3412-3714>

УДК 637.5.03:006.86:637.514.97

Исследование сорбционных характеристик говяжьего рубца как объекта обезвоживания в технологии имитационного шпика

О. Н. Красуля, П. Д. Осмоловский, А. Х-Х. Нугманов,
С. А. Серегин*, И. Р. Муханбетова

*Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, г. Москва, Россия;
e-mail: seregin@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3070-7755>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
07.05.2026;

получена
после доработки
05.06.2026;

принята
к публикации
30.06.2026

Ключевые слова:

говяжий рубец,
имитационный шпик,
влажность, сушка,
гигроскопические
характеристики,
изотермы сорбции,
энергия связи влаги
с материалом

Говяжий рубец, являясь наиболее крупным отделом желудка жвачных животных, представляет собой значительный, но недооцененный ресурс в структуре рецептурных ингредиентов, используемых при производстве мясных продуктов. На современном этапе развития колбасного производства в России ощущается устойчивый дефицит традиционного сырья – натурального свиного шпика. В этих условиях актуальным становится поиск функциональных ингредиентов, способных частично заместить шпик, не ухудшая ключевых качественных параметров готовой продукции. Одним из наиболее перспективных решений проблемы выступает коллагенсодержащее сырье, в частности, говяжий рубец. Введенный в рецептуру взамен части шпика, модифицированный белок из говяжьего рубца обеспечивает необходимую сочность и пластичность изделия за счет удержания жира, а также формирует упругую текстуру в готовом продукте. Внедрение сушеных коллагенсодержащих продуктов – одно из стратегических направлений рационализации ресурсов и повышения функционально-технологических свойств мясных пищевых систем. В результате проведения серии экспериментальных исследований гигроскопических характеристик говяжьего рубца как объекта обезвоживания и основы имитационного шпика выявлены диапазоны равновесной влажности материала в интервале от 2,8 до 48,2 % (на сухую массу) при изменении активности воды от 0,10 до 0,90 и температуре 55 °С. Это позволило определить технологически обоснованную критическую точку – влагосодержание 12 % на сухую массу ($10,5 \pm 0,5$ % на общую массу), соответствующую переходу от прочносвязанной адсорбционной влаги к капиллярно-связанной и гарантирующую микробиологическую стабильность продукта при хранении. Полученные результаты позволяют обосновать целесообразность конечную влажность продукта после сушки, минимизацию окислительных и ферментативных процессов, а также максимальную сохранность функционально-технологических свойств нативного коллагенсодержащего сырья.

Для цитирования

Красуля О. Н. и др. Исследование сорбционных характеристик говяжьего рубца как объекта обезвоживания в технологии имитационного шпика. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 403–416. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-403-416>.

Investigation of sorption characteristics of beef rumen as an object of dehydration in imitation bacon technology

Olga N. Krasulya, Pavel D. Osmolovsky, Albert H. Nugmanov,
Sergey A. Seregin*, Ilmira R. Mukhanbetova

*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia;
e-mail: seregin@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3070-7755>

Article info

Received
07.05.2026;

received
in revised form
05.06.2026;

accepted
30.06.2026

Key words:

beef tripe,
imitation bacon,
humidity, drying,
hygroscopic
characteristics,
sorption isotherms,
binding energy
of moisture
to the material

Abstract

Beef tripe, being the largest section of the stomach of ruminants, is a significant but still underestimated resource in the structure of prescription ingredients used in the production of meat products. At the current stage of sausage production development in Russia, there is a steady shortage of traditional raw materials – natural pork fat. In these conditions, the search for functional ingredients that can partially replace lard without compromising the key quality parameters of the finished product is becoming increasingly relevant. One of the most promising solutions to the problem is collagen-containing raw materials, in particular, beef tripe. Introduced into the formulation instead of a part of the bacon, the modified protein from beef tripe provides the necessary juiciness and plasticity of the product by retaining fat, and forms an elastic texture in the finished product. The introduction of dried collagen-containing products is one of the strategic directions for rationalizing resources and improving the functional and technological properties of meat food systems. As a result of a series of experimental studies of the hygroscopic characteristics of beef rumen as an object of dehydration and the basis of imitation bacon, ranges of equilibrium moisture content of the material in the range from 2.8 to 48.2 % (per dry mass) were revealed with a change in water activity from 0.10 to 0.90 and a temperature of 55 °C, which made it possible to determine a technologically sound critical point – moisture content of 12 % per dry weight (10.5 ± 0.5 % per total weight), corresponding to the transition from tightly bound adsorption moisture to capillary-bound and guaranteeing the microbiological stability of the product during storage. The results obtained allow us to scientifically substantiate the appropriate final moisture content of the product after drying, minimizing oxidative and enzymatic processes, as well as maximizing the preservation of the functional and technological properties of native collagen-containing raw materials.

For citation

Krasulya, O. N. et al. 2026. Investigation of sorption characteristics of beef rumen as an object of dehydration in imitation bacon technology. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 403–416. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-403-416>.

Введение

В условиях роста мирового населения и повышения нагрузки на экосистемы вторичное сырье мясной промышленности, к которому традиционно относят субпродукты (печень, сердце, рубцы, легкие, кровь и др.), перестает рассматриваться исключительно как низколиквидные продукты, трансформируясь в стратегический источник полноценных белков, липидов, микронутриентов и биологически активных веществ (Беспалова, 2025; Власенкова и др., 2022). Однако их широкомасштабная интеграция в пищевые системы сталкивается с комплексом взаимосвязанных проблем различного характера, при этом ключевыми остаются технологические ограничения, связанные с нестабильными функционально-технологическими свойствами и выраженными органолептическими особенностями многих видов субпродуктов¹ (Беспалова, 2025; Елисеева и др., 2022). Тем не менее их адаптация к промышленной переработке требует углубленных исследований взаимосвязи между биохимическим составом, структурой тканей, параметрами обработки и конечными свойствами пищевого продукта.

Говяжий рубец, являясь наиболее крупным отделом желудка жвачных животных, представляет собой значительный, но пока недооцененный ресурс в структуре мясных субпродуктов (Баженова и др., 2022; Муханбетова, 2024; Ходорева и др., 2022). Несмотря на относительно низкую потребительскую популярность в сравнении с печенью, сердцем или языком, что исторически связано с его специфическими органолептическими характеристиками и необходимостью сложной предварительной обработки, его потенциал для глубокой переработки и создания продуктов с высокой добавочной стоимостью весьма высок.

Коллагенсодержащее сырье, к которому относится рубец, служит отличной основой для получения желирующих агентов, белковых гидролизатов, а также является ключевым компонентом при создании структурированных пищевых систем – от традиционных ливерных колбас и зельцев до инновационных текстурированных аналогов мясного сырья. В говяжьем рубце содержится около 12 % белка, а по содержанию незаменимых аминокислот белок рубца приближен к рекомендованным ФАО/ВОЗ показателям идеального белка. Говяжий рубец характеризуется высоким содержанием водорастворимых витаминов группы В (В2, В3, В4, В5, В9, В12) и минеральных веществ, в том числе цинка и селена. После соответствующей очистки, обезжиривания и гидротермической обработки рубец приобретает нейтральный вкус и способность формировать эластичную, плотную текстуру, что делает его ценным ингредиентом-структурантом в рецептурах комбинированных продуктов² (Голева и др., 2020; Shchekotova et al., 2019; Киселева и др., 2023; Ребезов и др., 2016; Соколов и др., 2008; Bazhenova et al., 2022; Fuerniss et al., 2024; Shukurlu et al., 2022).

На современном этапе развития колбасного производства в России ощущается устойчивый дефицит традиционного сырья, используемого для формирования сочности, пластичной консистенции и характерного вкуса, – натурального свиного шпика (Анисимова и др., 2015; Серегин, 2022).

В этих условиях все более актуальным становится поиск функциональных ингредиентов, способных частично заместить шпик, не ухудшая при этом ключевых качественных параметров готовой продукции. Одним из наиболее перспективных решений данной проблемы выступает коллагенсодержащее сырье, в частности, говяжий рубец.

Введенный в рецептуру взамен части шпика модифицированный рубцовый белок способствует улучшению связности фарша, обеспечивает необходимую сочность и пластичность изделия за счет удержания влаги и жира, а также формирует однородную, упругую текстуру в готовом продукте. Использование рубца говяжьего в качестве сырьевого компонента позволяет значительно улучшить пищевую и биологическую ценность имитационного шпика, открывает возможность его использования в продуктах функционального назначения, а также в продуктах, имеющих сертификаты "Халяль" и "Кошер" (Красуля и др., 2026).

Внедрение технологий производства имитационного шпика представляет стратегический интерес для мясоперерабатывающей отрасли не только в качестве ответа на текущие рыночные сложности, но и как самостоятельное направление, способное повысить экономическую устойчивость пищевых предприятий в долгосрочной перспективе.

Внедрение сушеных коллагенсодержащих продуктов представляет собой одно из стратегических направлений рационализации ресурсов и повышения функционально-технологических свойств мясных пищевых систем.

Процесс сушки является ключевым этапом в технологии получения стабильного при хранении полуфабриката из говяжьего рубца, предназначенного для дальнейшего использования в качестве структурообразующей основы имитационного шпика. От правильного выбора способа обезвоживания и рациональных режимных параметров зависят не только энергетические затраты и производительность процесса, но и сохранность нативных свойств коллагенсодержащего сырья, его способность к последующей гидратации и формированию устойчивой гелевой структуры.

¹ Табакаев А. В., Лях В. А., Табакаева О. В. Рациональная переработка вторичного мясного сырья. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. 132 с.

² Там же.

Для сушки коллагенсодержащего сырья с целью получения стабильных ингредиентов оптимальным является конвекционный способ с рационализированными режимами. Несмотря на присущие ему недостатки (высокая энергоемкость, риск локального перегрева), конвекционная сушка в щадящем режиме позволяет найти баланс между сохранением функциональных свойств белка, производительностью и экономической целесообразностью, что подтверждает ее приоритетность для массовой переработки вторичного сырья.

При определении рациональных режимов влагоудаления из термолабильных субстанций, к которым относится говяжий рубец, и моделирования тепломассообменного процесса целесообразно изучить гигроскопические характеристики этого субпродукта, что и послужило целью данного исследования.

Гигроскопические свойства пищевого сырья, в частности говяжьего рубца, характеризуют его способность поглощать и удерживать влагу из окружающей среды (Титов и др., 2021; Суйчинов и др., 2025; Титов и др., 2006). Знание равновесной влажности материала при различных значениях активности воды и температуры позволяет научно обосновать целесообразную конечную влажность продукта после сушки, гарантирующую его микробиологическую стабильность, минимизацию окислительных и ферментативных процессов (Макарова, 2018; Степаненко и др., 2017; Цуканов и др., 2010), а также максимальную сохранность функционально-технологических свойств коллагенсодержащего сырья.

Материалы и методы

Объектом исследования послужил говяжий рубец в высушенном состоянии (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид высушенного говяжьего рубца
Fig. 1. Appearance of dried beef tripe

Высушенный рубец получали следующим образом: рубец в охлажденном состоянии измельчали на волчке с диаметром отверстий решетки 3 мм, а затем высушивали при температуре 55 °С в конвекционной сушилке в течение 15 ч.

Исходный говяжий рубец, используемый в экспериментах для определения оптимальных параметров сушки, характеризовался высокой начальной влажностью. Согласно результатам анализа, проведенным стандартным гравиметрическим методом на анализаторе влажности МХ-50 (Арабова и др., 2023; Яснгов и др., 2024) (высушивание до постоянной массы при температуре 105 °С), массовая доля влаги в свежем очищенном и измельченном рубце составляла в среднем $82,6 \pm 1,4$ %. Столь высокое содержание воды характерно для субпродуктов соединительнотканного происхождения и обусловлено особенностями морфологического строения рубца, значительную часть объема которого занимает межклеточный матрикс, способный удерживать большое количество влаги. Удаление этой влаги до уровня, обеспечивающего стабильность продукта при хранении, является основной задачей процесса конвективной сушки.

Для определения равновесной влажности и построения изотерм сорбции использовали весовой статический метод с применением эксикаторов, в которых с помощью водных растворов серной кислоты создавалась среда с постоянной активностью воды (a_w) в диапазоне от 0,10 до 0,90 (Яснгов и др., 2024; Нугманов и др., 2022). Предварительно образцы говяжьего рубца высушивали до абсолютно сухого состояния при температуре 105 °С, после чего помещали в эксикатор над водным раствором серной кислоты

и выдерживали в термостате при постоянной температуре до достижения равновесного состояния, критерием которого являлось постоянство массы образцов (изменение не более 0,1 % за 24 ч). Учитывая, что в соответствии с разрабатываемой технологией процесс конвективного обезвоживания предполагается проводить при температуре сушильного агента 55 °С, построение изотерм сорбции осуществляли именно при этой температуре, что позволяет наиболее корректно интерпретировать формы связи влаги с материалом в условиях, приближенных к реальным режимам сушки. Параллельно, для оценки влияния температурного фактора и возможности более корректного выбора условий для хранения высушенного коллагенсодержащего сырья (относительная влажность воздуха) изотерму сорбции определяли также и при температуре 20 °С.

Для математического описания полученных изотерм сорбции и возможности их последующего использования в инженерных расчетах процессов сушки и хранения проведена аппроксимация экспериментальных данных с использованием модели Гуттенгейма – Андерсона – де Бура (GAB), которая признана наиболее универсальной для описания гигроскопического равновесия пищевых материалов во всем диапазоне активности воды (*Isaac et al., 2021; Roos, 2024; Zhang et al., 2022*). Выбор модели GAB обусловлен ее способностью адекватно описывать изотермы сорбции как в области низких, так и высоких значений активности воды, а также физической интерпретируемостью ее параметров. Модель GAB имеет следующий вид:

$$W = \frac{W_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)}, \quad (1)$$

где a_w – активность воды; W_m – влажность монослоя (содержание влаги, соответствующее заполнению активных центров мономолекулярным слоем), % на сухую массу; C – константа Гуттенгейма, связанная с энергией взаимодействия молекул воды в монослое; K – константа, характеризующая энергию взаимодействия молекул в полимолекулярных слоях.

Для определения параметров, входящих в уравнение (1), преобразуем его в полином второй степени относительно переменной a_w , где зависимой переменной будет отношение a_w/W . Выполним следующие алгебраические преобразования.

Шаг 1. Выразим величину, обратную к W

$$\frac{1}{W} = \frac{(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)}{W_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}.$$

Шаг 2. Умножим обе части на a_w , чтобы получить искомое отношение a_w/W

$$\frac{a_w}{W} = \frac{(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)}{W_m \cdot C \cdot K}.$$

Шаг 3. Раскроем скобки в числителе, рассматривая $1 - Ka_w + CKa_w$ как сумму $(1 - Ka_w) + CKa_w$

$$\begin{aligned} (1 - Ka_w)(1 - Ka_w + CKa_w) &= (1 - Ka_w)^2 + CKa_w(1 - Ka_w) = \\ &= 1 - 2Ka_w + K^2 a_w^2 + CKa_w - CK^2 a_w^2 = \\ &= 1 + (CK - 2K)a_w + (K^2 - CK^2)a_w^2 = \\ &= 1 + K(C - 2)a_w + K^2(1 - C)a_w^2. \end{aligned}$$

Шаг 4. Подставим полученное выражение обратно в формулу для a_w/W

$$\frac{a_w}{W} = \frac{1 + K(C - 2)a_w + K^2(1 - C)a_w^2}{W_m \cdot C \cdot K}.$$

Шаг 5. Разделим каждый член числителя на знаменатель $W_m \cdot C \cdot K$

$$\frac{a_w}{W} = \frac{1}{W_m \cdot C \cdot K} + \frac{K(C - 2)}{W_m \cdot C \cdot K} a_w + \frac{K^2(1 - C)}{W_m \cdot C \cdot K} a_w^2.$$

Шаг 6. Упростим коэффициенты при a_w и a_w^2 , сократив K

$$\frac{a_w}{W} = \frac{1}{W_m \cdot C \cdot K} + \frac{C - 2}{W_m \cdot C} a_w + \frac{K(1 - C)}{W_m \cdot C} a_w^2. \quad (2)$$

Таким образом, мы получили искомое выражение (2) в виде полинома второй степени, в котором коэффициенты полинома выражаются через параметры модели GAB следующим образом.

Свободный член

$$a_0 = \frac{1}{W_m \cdot C \cdot K}. \quad (3)$$

Коэффициент при a_w (линейный член)

$$a_1 = \frac{C - 2}{W_m \cdot C}. \quad (4)$$

Коэффициент при a_w^2 (квадратичный член)

$$a_2 = \frac{K(1-C)}{W_m \cdot C}. \quad (5)$$

Полученное уравнение представляет собой квадратичную зависимость величины a_w/W от активности воды a_w , которое может быть использовано для определения параметров модели ГАВ графическим методом по экспериментальным данным. Считаем, что для коллагенсодержащего сырья, такого как рубец, графический метод с использованием полиномиальной аппроксимации может давать более корректные результаты, особенно при корректном выборе диапазона аппроксимации.

Обоснование выбора графического метода для коллагенсодержащего сырья следует из его специфических особенностей:

- высокая гигроскопичность благодаря развитой фибриллярной структуре коллагена;
- наличие нескольких форм связи влаги (адсорбционная, осмотическая, капиллярная);
- чувствительность к температурным воздействиям в области денатурации (55–60 °С);
- неоднородность морфологической структуры (ворсинки, мышечные и соединительнотканые слои).

В связи с этим при использовании метода нелинейной регрессии и минимизации общей суммы квадратов отклонений полученный результат может "сглаживать" важные особенности изотермы в критических областях (низкие a_w – где формируется монослой, и высокие a_w – где происходит капиллярная конденсация). Графический метод с полиномиальной аппроксимацией позволяет более точно определить параметр W_m , критически важный для коллагеновых материалов.

Учитывая, что процесс конвективной сушки проводили при температуре 55 °С, что соответствует нижней границе температурной денатурации коллагена (55–60 °С), полученные изотермы сорбции характеризуют частично денатурированный коллаген. Это полностью соответствует реальному состоянию сырья в технологическом процессе обезвоживания и не снижает корректности их использования для инженерных расчетов.

Результаты и обсуждение

Полученные экспериментальные данные представляли в виде зависимости равновесной влажности материала (W_p , % на сухую массу) от активности воды (a_w).

Экспериментальные точки изотерм сорбции, полученные для говяжьего рубца при температурах 20 и 55 °С, представлены в табл. 1 и графически на рис. 2. Эксперименты проводили в пятикратной повторности для каждой температуры и каждого значения a_w . Экспериментальные данные обработаны методами математической статистики. Результаты представлены в виде среднего арифметического $\pm$ стандартное отклонение при доверительной вероятности 0,95.

Таблица 1. Равновесная влажность говяжьего рубца (W_p , % на сухую массу) при температурах 20 и 55 °С в зависимости от активности воды (a_w)
Table 1. Equilibrium moisture content of beef tripe (W_p , % per dry weight) at temperatures of 20 and 55 °С depending on the water activity (a_w)

Активность воды, a_w	Равновесная влажность W_p при 20 °С, %	Равновесная влажность W_p при 55 °С, %
0,10	3,5 $\pm$ 0,2	2,8 $\pm$ 0,4
0,20	5,7 $\pm$ 0,4	4,5 $\pm$ 0,2
0,30	7,8 $\pm$ 0,1	6,1 $\pm$ 0,3
0,40	10,0 $\pm$ 0,9	7,8 $\pm$ 0,2
0,50	12,6 $\pm$ 0,5	9,9 $\pm$ 0,2
0,60	15,8 $\pm$ 0,8	12,5 $\pm$ 0,5
0,70	20,3 $\pm$ 0,6	16,4 $\pm$ 0,2
0,75	24,1 $\pm$ 0,4	19,8 $\pm$ 0,2
0,80	30,2 $\pm$ 0,3	25,1 $\pm$ 0,3
0,85	40,5 $\pm$ 0,4	34,6 $\pm$ 0,3
0,90	55,4 $\pm$ 0,7	48,2 $\pm$ 0,8

Для каждого значения a_w сравнение средних равновесных влажностей при 20 и 55 °С выполнено с помощью t -критерия Стьюдента ($n = 5$, $\alpha = 0,05$). Рассчитанные значения t составили от 4,12 до 11,45 при критическом значении 2,306, что подтверждает статистическую значимость различий во всем диапазоне $a_w = 0,10 \dots 0,90$. Следовательно, наблюдаемое снижение равновесной влажности с ростом температуры не является случайным.

Анализ полученных данных, особенно на графических зависимостях (рис. 2), показывает, что изотермы сорбции влаги говяжьим рубцом при обеих температурах имеют характерную S-образную форму,

свойственную большинству капиллярно-пористых коллоидных материалов (Яснoв и др., 2024; Нугманов и др., 2022; Выродов, 2002).

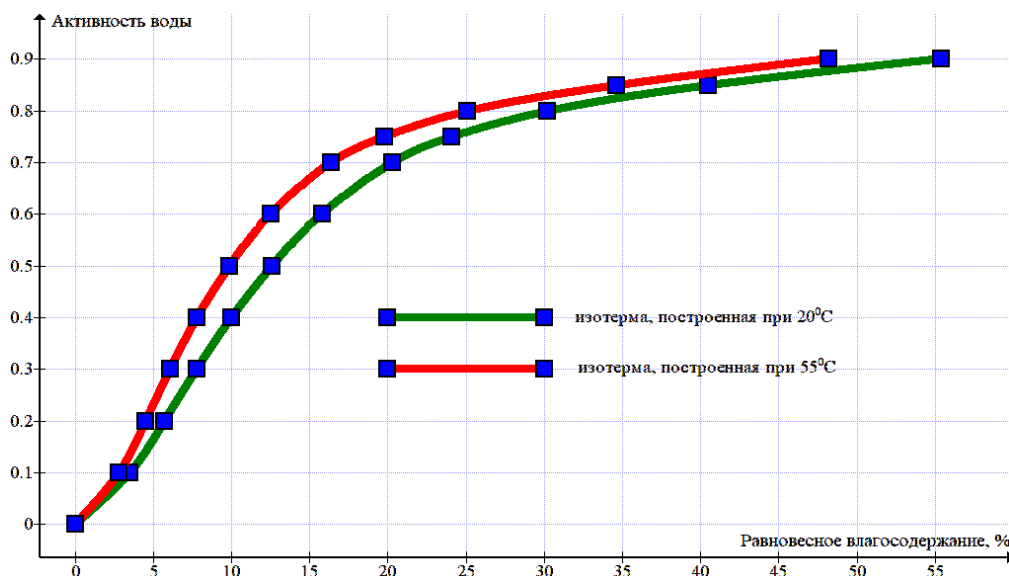


Рис. 2. Изотермы сорбции влаги говяжьим рубцом

Fig. 2. Isotherms of moisture sorption by beef rumen

При этом на построенных изотермах сорбции (рис. 3) наблюдается четко выраженная зависимость равновесной влажности от температуры: при одной и той же активности воды равновесная влажность при 20 °С выше, чем при 55 °С, что объясняется экзотермическим характером процесса сорбции и большей подвижностью молекул воды при повышенных температурах, облегчающей их десорбцию. Данное различие становится более заметным в области высоких значений ($a_w > 0,7$), где основной вклад в удержание влаги вносят капиллярные силы. Так, при $a_w = 0,9$ разница в равновесной влажности составляет 7,2 %, а при $a_w = 0,5$ –2,7 %.

В области низких значений активности воды ($a_w < 0,3$) наблюдается сравнительно небольшое увеличение равновесной влажности, что соответствует образованию мономолекулярного слоя сорбированной влаги, наиболее прочно связанной с активными центрами белковых молекул коллагена. В интервале a_w от 0,3 до 0,7 происходит формирование полимолекулярных слоев, при этом кривые становятся более пологими. Наиболее интенсивный рост равновесной влажности отмечается при $a_w > 0,7$, что обусловлено капиллярной конденсацией влаги в микропорах и межволоконных пространствах соединительной ткани.

Для определения параметров модели GAB графическим методом приведем исходные экспериментальные данные (табл. 2).

Таблица 2. Исходные экспериментальные данные для определения параметров модели GAB

Table 2. Initial experimental data for determining the parameters of the GAB model

a_w	Для температуры 55 °С		Для температуры 20 °С	
	W_p , %	a_w/W_p	W_p , %	a_w/W_p
0,10	2,8	0,03571	3,5	0,02857
0,20	4,5	0,04444	5,7	0,03509
0,30	6,1	0,04918	7,8	0,03846
0,40	7,8	0,05128	10,0	0,04000
0,50	9,9	0,05051	12,6	0,03968
0,60	12,5	0,04800	15,8	0,03797
0,70	16,4	0,04268	20,3	0,03448
0,75	19,8	0,03788	24,1	0,03112
0,80	25,1	0,03187	30,2	0,02649
0,85	34,6	0,02457	40,5	0,02099
0,90	48,2	0,01867	55,4	0,01625

Для аппроксимации используем уравнение (2) в общем виде

$$\frac{a_w}{W} = a_0 + a_1 \cdot a_w + a_2 \cdot a_w^2. \quad (6)$$

Для температуры 55 °С

Проведем расчет коэффициентов методом наименьших квадратов. Для этого составим систему нормальных уравнений

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum a_w + a_2 \sum a_w^2 = \sum \frac{a_w}{W} \\ a_0 \sum a_w + a_1 \sum a_w^2 + a_2 \sum a_w^3 = \sum \left(\frac{a_w}{W} \cdot a_w \right) \\ a_0 \sum a_w^2 + a_1 \sum a_w^3 + a_2 \sum a_w^4 = \sum \left(\frac{a_w}{W} \cdot a_w^2 \right) \end{cases} \quad (7)$$

Вычислим необходимые суммы ($n = 11$), результаты вычисления представлены в табл. 3.

Подставим суммы в систему уравнений

$$\begin{cases} 11a_0 + 6,10a_1 + 4,1325a_2 = 0,43479 \\ 6,10a_0 + 4,1325a_1 + 3,0610a_2 = 0,22325 \\ 4,1325a_0 + 3,0610a_1 + 2,3715a_2 = 0,14015 \end{cases}$$

Решая систему методом Крамера или матричным способом, получаем

$$a_0 = 0,0285; a_1 = 0,1027; a_2 = -0,0983.$$

Таблица 3. Результаты вычисления необходимых сумм для температуры 55 °С

Table 3. The results of calculating the required amounts for a temperature of 55 °С

a_w	a_w^2	a_w^3	a_w^4	$\frac{a_w}{W}$	$\left(\frac{a_w}{W} \cdot a_w \right)$	$\left(\frac{a_w}{W} \cdot a_w^2 \right)$
0,10	0,01	0,001	0,0001	0,03571	0,003571	0,0003571
0,20	0,04	0,008	0,0016	0,04444	0,008888	0,0017776
0,30	0,09	0,027	0,0081	0,04918	0,014754	0,0044262
0,40	0,16	0,064	0,0256	0,05128	0,020512	0,0082048
0,50	0,25	0,125	0,0625	0,05051	0,025255	0,0126275
0,60	0,36	0,216	0,1296	0,04800	0,028800	0,0172800
0,70	0,49	0,343	0,2401	0,04268	0,029876	0,0209132
0,75	0,5625	0,421875	0,316406	0,03788	0,028410	0,0213075
0,80	0,64	0,512	0,4096	0,03187	0,025496	0,0203968
0,85	0,7225	0,614125	0,522006	0,02457	0,020885	0,0177519
0,90	0,81	0,729	0,6561	0,01867	0,016803	0,0151227
$\Sigma = 6,10$	$\Sigma = 4,1325$	$\Sigma = 3,0610$	$\Sigma = 2,3715$	$\Sigma = 0,43479$	$\Sigma = 0,22325$	$\Sigma = 0,14015$

Таким образом, полиномиальное уравнение для температуры 55 °С имеет вид

$$\frac{a_w}{W} = 0,0285 + 0,1027 \cdot a_w - 0,0983 \cdot a_w^2. \quad (8)$$

Для температуры 20 °С

Аналогично вычисляем суммы и решаем систему. Опуская промежуточные вычисления, получаем

$$a_0 = 0,0226; a_1 = 0,0904; a_2 = -0,0875.$$

Полиномиальное уравнение для температуры 20 °С

$$\frac{a_w}{W} = 0,0226 + 0,0904 \cdot a_w - 0,0875 \cdot a_w^2. \quad (9)$$

На рис. 3 представлены аппроксимирующие полиномиальные кривые для обеих температур. Характер кривых подтверждает адекватность квадратичной аппроксимации: наблюдается четкий экстремум (максимум) в области средних значений активности воды, что соответствует теоретическим представлениям о сорбционных свойствах капиллярно-пористых материалов.

Анализ полученных полиномиальных кривых изотерм сорбции (рис. 3) указывает на экстремум функции в районе значений a_w на уровне 0,5...0,55, и если отложить их на рис. 2, то получается, что граница между капиллярно-связанной влагой и адсорбционно-связанной проходит на уровне $W \approx 12\%$.

Полученная методом графической аппроксимации точка перегиба (экстремум) на зависимости

$\frac{a_w}{W} = f(a_w)$ имеет важное фундаментальное физико-химическое значение. Согласно теоретическим основам теории сушки и сорбционного равновесия (Касаткин, 2008) максимум на кривой, описываемой уравнениями

(8, 9), соответствует окончанию процесса заполнения мономолекулярного слоя и началу интенсивной полимолекулярной адсорбции и капиллярной конденсации.

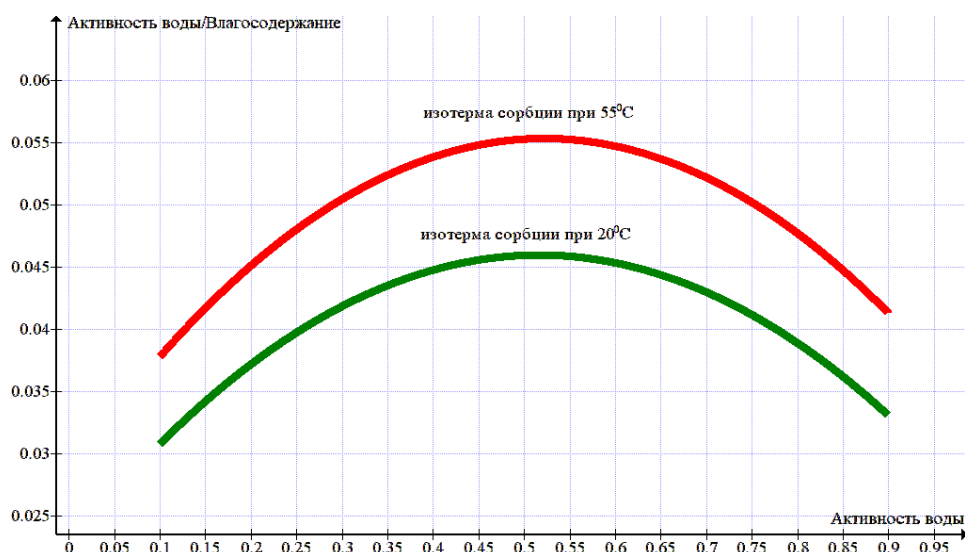


Рис. 3. Аппроксимирующие полиномиальные кривые изотерм сорбции влаги говяжьим рубцом для двух температур

Fig. 3. Approximating polynomial curves of moisture sorption isotherms by beef rumen for two temperatures

Для исследуемого коллагенсодержащего сырья (говяжий рубец) данная критическая точка, как показал анализ, соответствует равновесному влагодержанию на уровне 12 % при температуре 55°. С технологической точки зрения это значение является пограничным:

- Ниже 12 % (зона стабильности). При влажности ниже 12 % ($a_w \leq 0,5...0,55$) практически вся оставшаяся в продукте влага находится в связанном состоянии, входя в том числе и в структуру мономолекулярного слоя. Такая вода не является растворителем, недоступна для микроорганизмов и не участвует в химических реакциях, ведущих к порче продукта (гидролиз, окисление). Таким образом, достижение влагодержания 12 % гарантирует микробиологическую стабильность сухого полуфабриката при хранении.

- Выше 12 % (зона риска). При влажности, превышающей 12 %, начинает активно накапливаться менее связанная влага, которая может служить благоприятной средой для развития остаточной микрофлоры и ускорения нежелательных биохимических процессов. Хранение продукта с влажностью выше этого порога потребует применения специальных условий (вакуум, модифицированная атмосфера, пониженные температуры), что экономически менее целесообразно.

Следует отметить, что точное значение влажности мономолекулярного слоя (W_m) в модели GAB (1) обычно составляет для белковых продуктов 5–8 % на сухую массу (Roos, 2024; Zhang et al., 2022). Полученная нами критическая точка (12 %) превышает типичные значения W_m , что подтверждает, что она соответствует не строго монослою, а технологической границе перехода от связанной влаги к капиллярно-связанной. Такой подход широко применяется при обосновании режимов сушки коллагенсодержащего сырья (Яснов и др., 2024; Нугманов и др., 2022) и не противоречит физической сущности процесса.

Таким образом, установленная граница влагодержания на уровне 12 % является технологически рациональной. Обезвоживание до этого уровня обеспечивает, с одной стороны, надежную консервацию продукта за счет перевода всей влаги в прочносвязанное состояние, а с другой – предотвращает излишние энергозатраты на удаление более прочно связанной влаги монослоя и минимизирует риск тепловой денатурации коллагена, которая может негативно сказаться на его способности к последующей гидратации и структурообразованию.

Для проверки корректности применения модели GAB (условие: $0 < K \leq 1$) рассчитаны значения константы K для обеих температур. Для расчета использованы полученные ранее полиномиальные коэффициенты уравнения (6), которые связаны с параметрами GAB соотношениями (3), (4) и (5).

Для температуры 55 °C

Из отношения (10) получено квадратное уравнение (11):

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{a_1(1-C)}{a_0(1-C)^2}, \quad (10)$$

$$0,265C^2 - 2,062C + 2,062 = 0. \quad (11)$$

Корни: $C = 6,59$ (физически значимый, $C > 2$) и $C = 1,18$ (отброшен).

Далее из соотношения (12) находим:

$$K = \frac{a_1}{a_0(C-2)}, \quad (12)$$

$$K = \frac{0,1027}{0,0285(6,59-2)} = 0,79.$$

Для температуры 20 °C

Аналогично

$$0,242C^2 - 1,968C + 1,968 = 0. \quad (13)$$

Физически значимый корень $C = 6,97$.

$$K = \frac{0,0904}{0,0226(6,97-2)} = 0,81.$$

Оба значения K удовлетворяют необходимому условию, следовательно, использование модели GAB для описания изотерм сорбции говяжьего рубца в исследованном диапазоне активностей воды и при температурах 20 и 55 °C является корректным.

В практике технологии мясных продуктов и нормативной документации принято оперировать показателем влажности (W_k), выраженной в процентах к общей массе продукта. Пересчет влагосодержания W (% на сухую массу) во влажность W_k (% на общую массу) осуществляется по формуле

$$W_k = \frac{W}{100+W} \cdot 100 \%. \quad (14)$$

Подставляя значение $W = 12 \%$, полученное из анализа сорбционных характеристик, рассчитаем целевую W_k высушенного продукта

$$W_k = \frac{12}{100+12} \cdot 100 \% = 10,71 \%.$$

С учетом погрешности эксперимента и технологического запаса принимаем конечную влажность высушенного говяжьего рубца, равную $10,5 \pm 0,5 \%$. Следовательно, в качестве целевой конечной влажности высушенного говяжьего рубца, предназначенного для использования в качестве коллагенсодержащей основы имитационного шпика, принимаем значение $W_k = 10,5 \%$ (на общую массу), что соответствует влагосодержанию на уровне $W = 12 \%$ (на сухую массу).

Высушенный по оптимальным параметрам рубец гидратировали водой в соотношении 1 : 3 (рубец : вода) в течение 10 ч и использовали для изготовления имитационного шпика согласно технологической схеме, представленной на рис. 4.



Рис. 4. Технологическая схема производства имитационного шпика из говяжьего рубца
Fig. 4. Technological scheme for the production of imitation bacon from beef tripe

В качестве адаптивной пищевой добавки использовали "Миксвел К" (группа компаний "Крист"), состоящую из загустителя E401, уплотнителя E516, стабилизаторов E450iii и E339(iii), а также красителя E171. Согласно рекомендациям компании-разработчика для производства имитационного шпика соотношение добавка : жиродержащее сырье : вода должно составлять 1 : 10 : 20. В качестве антиоксиданта и антибактериального агента применяли новый отечественный препарат "Виллафита Цитровиталь" (производство ООО "Арнебия") с экстрактом косточек грейпфрута в количестве 4 % к массе эмульсии. В качестве ароматизатора использовали жидкий дым ольховый (производство ООО "Союз С") в количестве 1 % к массе эмульсии.

Разработанная технология с применением адаптивной пищевой добавки и высушенного рубца позволяет получать продукт с заданными структурно-механическими свойствами, низким уровнем синерезиса и высокой окислительной стабильностью. Полученный имитационный шпик демонстрирует высокую термостабильность, сохраняя форму и адгезию с мясным фаршем при термообработке, что подтверждает целесообразность его применения в широком ассортименте мясных изделий (Красуля и др., 2026).

Заключение

В результате проведения опытных серий выявлены величины гигроскопических характеристик в технологически обоснованных рамках их варьирования. Сравнение представленных результатов с известными для подобных материалов данными показывает их адекватность без противоречий, поэтому их можно успешно применять в инженерной практике пищевой индустрии.

Таким образом, поставленная в статье цель полностью достигнута. Установленное значение влажности $10,5 \pm 0,5$ % на общую массу является пограничным между областями адсорбционно-связанной и капиллярно-связанной влаги. Дальнейшее определение параметров модели GAB путем решения системы уравнений, хотя и возможно математически, выходит за рамки задач настоящего исследования, поскольку полученное конкретное значение конечной влажности является достаточным и необходимым условием для перехода к обоснованию режимов конвективной сушки.

Высушенный рубец по оптимальным параметрам, приведенным выше, имеет продолжительный срок хранения в отличие от нативного, и может использоваться в производственном процессе изготовления имитационного шпика в зависимости от потребности.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Анисимова А. А., Забашта А. Г. Сравнение качества имитационного и натурального шпика // Мясные технологии. 2015. № 4(148). С. 18–19. EDN: TNZHFP.
- Арабова З. М., Алексанян И. Ю., Нугманов А. Х. Х., Бакин И. А. [и др.]. Изучение химического состава и оценка энергетической ценности смеси ястыков и икры ряда пресноводных рыб // Новые технологии. 2023. Т. 19, № 4. С. 20–30. DOI: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-4-20-30>. EDN: OGQEQR.
- Баженова Б. А., Бурханова А. Г., Жаргалова А. Ц., Тыхеев А. А. [и др.]. Исследование свойств коллагенсодержащего животного сырья, модифицированного ферментным препаратом // Все о мясе. 2022. № 1. С. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-1-48-52>. EDN: RKWOND.
- Беспалова О. В. Некоторые аспекты решения проблемы отходов мясного производства // Health, Food & Biotechnology. 2025. Т. 7, № 1. С. 27–41. DOI: <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i1.s247>. EDN: EFBDEA.
- Власенкова Т. А., Паикидзе А. А., Афанасьева Г. А., Крылова Л. А. Пути инновационного развития предприятий мясной промышленности // Пищевая промышленность. 2022. № 1. С. 24–28. DOI: <https://doi.org/10.52653/ppi.2022.1.1.005>. EDN: IODJOJ.
- Выродов И. П. Физическая сущность сорбционных изотерм пищевых продуктов и природа в них сорбционной влаги // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2002. № 4(269). С. 38–39. EDN: QCUSVH.
- Голева М. А., Аникина Е. С., Махалова З. А., Кинсфатор О. А. Глубокая переработка отходов животноводства // Научные основы развития АПК : сб. науч. тр. по материалам XXII Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, Томск, 15 мая 2020 г. Томск, 2020. С. 169–171. EDN: ABXLKL.
- Елисеева А. А., Насиров Ю. З. Экологичность и безопасность технологических процессов в мясной промышленности // Теоретические и прикладные вопросы экономики, управления и образования : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 16–17 июня 2022 г. Пенза, 2022. С. 155–158. EDN: GUEGEX.
- Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М. : Альянс, 2008. 750 с.
- Киселева И. С., Рудик Ф. Я., Романова О. В. Ресурсосберегающие технологии переработки мясной продукции // Аграрный научный журнал. 2023. № 5. С. 140–145. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i5pp140-145>. EDN: DGKAXV.
- Красуля О. Н., Нугманов А. Х. Х., Жабенко Л. Л., Осмоловский П. Д. [и др.]. Термостабильный имитационный шпик из слизистых субпродуктов // Мясная индустрия. 2026. № 2. С. 15–19. DOI: 10.37861/2618-8252-2026-02-15-19. EDN: NUBSZE.

- Макарова Г. В. Роль барьера "Активность воды" в управлении безопасностью пищевых продуктов // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2018. № 20. С. 224–227. EDN: YLBGTB.
- Муханбетова И. Р. Коллаген из говяжьего рубца: потенциал в пищевой промышленности // Форум молодых ученых. 2024. № 7(95). С. 36–38. EDN: FUSCTO.
- Нугманов А. Х. Х., Мещерякова Г. С., Лебедев В. А., Алексанян И. Ю. [и др.]. Термодинамический анализ статических закономерностей влагопоглощения биополимером на базе его гигроскопических характеристик // Известия КГТУ. 2022. № 65. С. 52–65. DOI: <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-65-52-65>. EDN: CURGPN.
- Ребезов М. Б., Зинина О. В., Ребезов Я. М., Мирошникова Е. П. [и др.]. Разработка продуктов питания животного происхождения на основе биотехнологий // АПК России. 2016. Т. 23, № 2. С. 488–496. EDN: WCFFSR.
- Серегин С. А. Изучение влияния имитационного шпика на качественные показатели полукопченых колбас // Новейшие достижения в области медицины, здравоохранения и здоровьесберегающих технологий : сб. материалов I Междунар. конгресса, Кемерово, 28–30 ноября 2022 г. Кемерово, 2022. С. 407–410. DOI: <https://doi.org/10.21603/i-ic-125>. EDN: WWMMP.
- Соколов А. Ю., Митасева Л. Ф., Апраксина С. К. Новые способы переработки коллагенсодержащего сырья мясной промышленности // Все о мясе. 2008. № 6. С. 38–41. EDN: JYVBLX.
- Степаненко Е. И., Нехамкин Б. Л. Активность воды на страже качества рыбной продукции // Контроль качества продукции. 2017. № 10. С. 50–53. EDN: ZHZNCH.
- Суйчинов А. К., Есимбеков Ж. С., Капашева Г. А., Жужасарова Г. Е. Исследование физико-химических свойств говяжьих, конских и бараньих субпродуктовых паст // Вестник университета Шакарима. Серия технические науки. 2025. № 3(19). С. 225–233. DOI: [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-25](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-25). EDN: ZSRUUU.
- Титов Е. И., Апраксина С. К., Митасева Л. Ф. Особенности получения белкового продукта из коллагенсодержащих субпродуктов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2006. № 12. С. 71–77. EDN: IAXBGB.
- Титов Е. И., Соколов А. Ю., Литвинова Е. В., Шишкина Д. И. Влияние волокон пищевых на функционально-технологические свойства мясных систем // Все о мясе. 2021. № 4. С. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2021-4-30-36>.
- Ходорева О. Г., Марченко К. А., Гордынец С. А. Структурно-механические и функционально-технологические свойства субпродуктов говяжьих // Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья. 2022. № 17. С. 246–254. EDN: RIGLXX.
- Цуканов М. Ф., Черноморец А. Б. Технологические аспекты показателя "активность воды" и его роль в обеспечении качества продукции общественного питания // Технично-технологические проблемы сервиса. 2010. № 1(11). С. 58–63. EDN: MNJDPH.
- Яснот А. С., Бредихин С. А., Нугманов А. Х. Х., Алексанян И. Ю. [и др.]. Исследование плотности и гигроскопических характеристик печени сома как объекта обезвоживания // Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 69, № 3. С. 110–120. DOI: <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-69-10>. EDN: JNMTUW.
- Bazhenova B. A., Tykheev A. A., Yumzhir-Uydel Ts., Zabalueva Yu. Yu. [et al.]. Modification of collagen-containing animal raw materials for use in food products // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1052. Article number: 012032. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1052/1/012032>.
- Fuermis H. F., Gifford C. L., Mortensen E. G., Belk K. E. [et al.]. Nutrient analysis of raw united states beef offal items // Nutrients. 2024. Vol. 16, Iss. 18. Article number: 3104. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16183104>.
- Isaac N., Owino W., Ambuko J., Imathiu S. Moisture sorption properties of two varieties of dehydrated mango slices as determined by gravimetric method using Guggenheim – Anderson – de Boer model // Journal of Food Processing and Preservation. 2021. Vol. 45. Article number: e15041. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.15041>.
- Roos Y. H. Water sorption modeling and monolayer of biological and food materials // LWT. 2024. Vol. 201. Article number: 116271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116271>.
- Shukurlu Y., Salmanova A., Sharifova M. Biotechnological aspects of the modification of secondary collagen-containing raw materials – tripe for the production of cost-effective functional meat products // Food Science and Technology. 2022. Vol. 42. Article number: e85521. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.85521>.
- Shchekotova A. V., Khamagaeva I. S., Tsyrenov V. Zh., Darbakova N. V. [et al.]. Biotechnological processing procedures of collagen-containing raw materials for creation of functional foods // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Vol. 9, N 2. P. 250–259. DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-2-250-259>. EDN: CCWAJF.
- Zhang L., Grace P. M., Sun D.-W. A new theoretical model for moisture sorption isotherms and its application in deriving a hygroscopicity index for food products // Journal of Food Engineering. 2022. Vol. 315. Article number: 110817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110817>.

References

- Anisimova, A. A., Zabashta, A. G. 2015. Comparison of qualities imitative and natural spica. *Meat Technology*, 4(148), pp. 18–19. EDN: TNZHFP. (In Russ.)
- Arabova, Z. M., Alexanian, I. Yu., Nugmanov, A. H., Bakin, I. A. et al. 2023. Study of the chemical composition and assessment of the energy value of a mixture of eggs and eggs of a number of freshwater fish. *New Technologies*, 19(4), pp. 20–30. DOI: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-4-20-30>. EDN: OGQEQR. (In Russ.)
- Bazhenova, B. A., Burkhanova, A. G., Zhargalova, A. Ts., Tykheev, A. A. et al. 2022. Study of the properties of collagen-containing animal raw materials modified with an enzyme preparation. *Vsyo o Myase*, 1, pp. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-1-48-52>. EDN: RKWOND. (In Russ.)
- Bespalova, O. V. 2025. Some aspects of solving the problems of meat production yields. *Health, Food & Biotechnology*, 7(1), pp. 27–41. DOI: <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i1.s247>. EDN: EFBDEA. (In Russ.)
- Vlasenkova, T. A., Paykidze, A. A., Afanasyeva, G. A., Krylova, L. A. 2022. Ways of innovative development of meat industry enterprises. *Food Processing Industry*, 1, pp. 24–28. DOI: <https://doi.org/10.52653/ppi.2022.1.1.005>. EDN: IODJOJ. (In Russ.)
- Vyrodov, I. P. 2002. The physical essence of sorption isotherms of food products and the nature of sorption moisture in them. *News of Universities. Food Technology*, 4(269), pp. 38–39. EDN: QCUSVH. (In Russ.)
- Goleva, M. A., Anikina, E. S., Mahalova, Z. A., Kinsfator, O. A. 2020. Deep processing of livestock waste. Coll. of articles of scientific tr. based on materials from the XXII All-Russian (national) scientific and practical conf. students, graduate students and young scientists from international participation *Scientific foundations of the development of the agro-industrial complex*, Tomsk, May 15, 2020. Tomsk, pp. 169–171. EDN: ABXLKL. (In Russ.)
- Eliseeva, A. A., Nasirov, Yu. Z. 2022. Environmental friendliness and safety of technological processes in the meat industry. Coll. of articles of III Int. scientific-practical conf. *Theoretical and applied issues of economics, management and education*, Penza, June 16–17, 2022. Penza, pp. 155–158. EDN: GUEGEX. (In Russ.)
- Kasatkin, A. G. 2008. Basic processes and apparatus of chemical technology. Moscow. (In Russ.)
- Kiselyova, I. S., Rudik, F. Ya., Romanova, O. V. 2023. Resource-saving technologies for processing meat products. *The Agrarian Scientific Journal*, 5, pp. 140–145. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i5pp140-145>. EDN: DGKAXV. (In Russ.)
- Krasulya, O. N., Nugmanov, A. H., Zhabenko, L. L., Osmolovsky, P. D. et al. 2026. Heat-stable imitation lard from mucous by-products. *Meat Industry*, 2, pp. 15–19. DOI: 10.37861/2618-8252-2026-02-15-19. EDN: NUBSZE. (In Russ.)
- Makarova, G. V. 2018. The role of the Water Activity barrier in food safety management. *Current Issues in Improving the Technology of Production and Processing of Agricultural Products*, 20, pp. 224–227. EDN: YLBGTB. (In Russ.)
- Muhanbetova, I. R. 2024. Collagen from beef tripe: Potential in the food industry. *Forum of Young Scientists*, 7(95), pp. 36–38. EDN: FUSCTO. (In Russ.)
- Nugmanov, A. X., Meshcheryakova, G. S., Lebedev, V. A., Aleksanyan, I. Yu. et al. 2022. Thermodynamic analysis of static patterns of moisture absorption by a biopolymer based on its hygroscopic characteristics. *KSTU News*, 65, pp. 52–65. DOI: <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-65-52-65>. EDN: CURGPN. (In Russ.)
- Rebezov, M. B., Zinina, O. V., Rebezov, Ya. M., Miroshnikova, E. P. 2016. Development of food products of animal origin based on biotechnology. *Agro-Industrial Complex of Russia*, 23(2), pp. 488–496. EDN: WCFFSR. (In Russ.)
- Seregin, S. A. 2022. Study of the influence of imitation lard on the quality indicators of semi-smoked sausages. *The Latest Achievements of Medicine, Healthcare, and Health-Saving Technologies: Proceedings of the 1st International Congress*, Kemerovo, 28–30 November, 2022. Kemerovo, pp. 407–410. DOI: <https://doi.org/10.21603/i-ic-125>. EDN: WWMMWP. (In Russ.)
- Sokolov, A. Yu., Mitaseva, L. F., Apraksina, S. K. 2008. New methods for processing collagen-containing raw materials of meat industry. *Vsyo o Myase*, 6, pp. 38–41. EDN: JVYBLX. (In Russ.)
- Stepanenko, E. I., Nekhamkin, B. L. 2017. Water activity protects the quality of fish products. *Production Quality Control*, 10, pp. 50–53. EDN: ZHZNCH. (In Russ.)
- Suychinov, K., Esimbekov, Zh. S., Kapasheva, G. A., Zushhasarova, G. E. 2025. Study of the physicochemical properties of beef, horse and lamb by-product pastes. *Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences*, 3(19), pp. 225–233. DOI: [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-25](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-25). EDN: ZSRUUU. (In Russ.)
- Titov, E. I., Apraksina, S. K., Mitaseva, L. F. 2006. Features of obtaining a protein product from collagen-containing by-products. *Storage and Processing of Farm Products*, 12, pp. 71–77. EDN: IAXBGB. (In Russ.)
- Titov, E. I., Sokolov, A. Yu., Litvinova, E. V., Shishkina, D. I. 2021. The influence of dietary fiber on the functional and technological properties of meat systems. *Vsyo o Myase*, 4, pp. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2021-4-30-36>. (In Russ.)

- Khodoreva, O. G., Marchenko, K. A., Gordynets, S. A. 2022. Structural-mechanical and functional-technological properties of beef by-products. *Topical Issues of Processing of Meat and Milk Raw Materials*, 17, pp. 246–254. EDN: RIGLXX. (In Russ.)
- Tsukanov, M. F., Chernomorets, A. B. 2010. Technological aspects of the indicator Water Activity and its role in ensuring the quality of public catering products. *Technical and Technological Problems of Service*, 1(11), pp. 58–63. EDN: MNJDPH. (In Russ.)
- Yasnov, A. S., Bredikhin, S. A., Nugmanov, A. H., Aleksanyan, I. Yu. et al. 2024. Study of the density and hygroscopic characteristics of catfish liver as an object of dehydration. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*, 69(3), pp. 110–120. DOI: <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-69-10>. EDN: JNMTUW. (In Russ.)
- Bazhenova, B. A., Tykheev, A. A., Yumzhir-Uvdel, Ts., Zabalueva, Yu. Yu. et al. 2022. Modification of collagen-containing animal raw materials for use in food products. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1052. Article number: 012032. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1052/1/012032>.
- Fuerniss, H. F., Gifford, C. L., Mortensen, E. G., Belk, K. E. et al. 2024. Nutrient analysis of raw united states beef offal items. *Nutrients*, 16(18). Article number: 3104. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16183104>.
- Isaac, N., Owino, W., Ambuko, J., Imathiu, S. 2021. Moisture sorption properties of two varieties of dehydrated mango slices as determined by gravimetric method using Guggenheim – Anderson – de Boer model. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45. Article number: e15041. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.15041>.
- Roos, Y. H. 2024. Water sorption modeling and monolayer of biological and food materials. *LWT*, 201. Article number: 116271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116271>.
- Shukurlu, Y., Salmanova, A., Sharifova, M. 2022. Biotechnological aspects of the modification of secondary collagen-containing raw materials – tripe for the production of cost-effective functional meat products. *Food Science and Technology*, 42. Article number: e85521. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.85521>.
- Shchekotova, A. V., Khamagaeva, I. S., Tsyrenov, V. Zh., Darbakova, N. V. et al. 2019. Biotechnological processing procedures of collagen-containing raw materials for creation of functional foods. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 9(2), pp. 250–259. DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-2-250-259>. EDN: CCWAJF.
- Zhang, L., Grace, P. M., Sun, D.-W. 2022. A new theoretical model for moisture sorption isotherms and its application in deriving a hygroscopicity index for food products. *Journal of Food Engineering*, 315. Article number: 110817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110817>.

Сведения об авторах

Красуля Ольга Николаевна – ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Россия, 127434;
Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева,
д-р техн. наук, профессор;
e-mail: okrasulya@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8096-5210>

Olga N. Krasulya – 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, Russia, 127434;
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: okrasulya@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8096-5210>

Осмоловский Павел Дмитриевич – ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Россия, 127434;
Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева,
канд. сел.-хоз. наук;
e-mail: pavel.osmolovsku@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1131-1552>

Pavel D. Osmolovsky – 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, Russia, 127434;
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Cand. Sci. (Agricultural);
e-mail: pavel.osmolovsku@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1131-1552>

Нугманов Альберт Хамед-Харисович – ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Россия, 127434;
Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева,
д-р техн. наук, профессор;
e-mail: nugmanov@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

Albert H. Nugmanov – 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, Russia, 127434;
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: nugmanov@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

СерEGIN Сергей Александрович – ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Россия, 127434;
Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева,
канд. техн. наук, доцент;
e-mail: seregin@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3070-7755>

Sergey A. Seregin – 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, Russia, 127434;
Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: seregin@rgau-msha.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3070-7755>

Муханбетова Ильмира Руслановна – ул. Татищева, 16/1, г. Астрахань, Россия, 414056;
Астраханский государственный технический университет, аспирант;
e-mail: mukhanbetova.ir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6667-9190>

Ilmira R. Mukhanbetova – 16/1 Tatishcheva Str., Astrakhan, Russia, 414056;
Astrakhan State Technical University, PhD Student;
e-mail: mukhanbetova.ir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6667-9190>

УДК 637.181, 613.261

Разработка и оценка потребительских свойств ферментированного напитка на растительной основе

Г. В. Поснова, Н. Г. Иванова*, К. А. Панчук

*Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), г. Москва, Россия;

e-mail: n.ivanova@mgutm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3878-6355>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
25.12.2025;

получена
после доработки
28.04.2026;

принята
к публикации
25.05.2026

Ключевые слова:

растительный
ферментированный
напиток,
антиоксидантный
напиток,
пробиотики,
морковь,
шиповник,
мука абрикосовой
косточки,
масло зародышей
пшеницы

Для цитирования

В условиях возрастающего спроса на функциональные продукты питания разработан ферментированный напиток на растительной основе "ЛактоДзен", обладающий антиоксидантными и пробиотическими свойствами. Основой продукта является миндальный напиток, изготовленный путем измельчения предварительно замоченного в воде миндаля с последующим фильтрованием полученной суспензии. С целью обеспечения антиоксидантной активности, повышения содержания белка и пищевых волокон в состав ферментированного напитка включены порошок моркови и шиповника, масло зародышей пшеницы, обезжиренная мука из абрикосовой косточки. Дополнительное введение яблочного пектина позволяет увеличить содержание в напитке пищевых волокон и способствует стабилизации его консистенции. Ферментация миндального напитка осуществлялась с применением промышленного образца сухой закваски "Йогурт", содержащего чистые культуры *Streptococcus salivarius ssp. thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*, *Lactobacillus casei* в количестве 0,2 % к массе напитка. Разработанная технология производства включает этапы приготовления миндального напитка, гидратации обогащающих добавок, гомогенизации, пастеризации, ферментации и асептической фасовки. Готовый ферментированный напиток характеризуется однородным кремовым цветом с легким оранжевым оттенком, гармоничным вкусом с мягкой кислинкой ферментации, дополненной сладковатыми нотами миндаля и легким фруктовым оттенком шиповника. Запах сочетает молочнокислые и ореховые ароматы с тонкими травяными нотами. Консистенция – однородная, умеренно вязкая, что в целом обеспечивает приятное потребительское восприятие. Пищевая ценность порции (200 г) разработанного напитка "ЛактоДзен" составляет 4,2 г белка, 14,2 г жира, 4,7 г углеводов, 73,6 мкг витамина А, 10,1 мг витамина С и 11,4 мг витамина Е, энергетическая ценность 163 ккал. Продукт рекомендован для профилактики окислительного стресса, укрепления иммунной системы и поддержки микробиоты кишечника, особенно для вегетарианцев, лиц с непереносимостью лактозы и сторонников здорового питания.

Поснова Г. В. и др. Разработка и оценка потребительских свойств ферментированного напитка на растительной основе. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 417–432. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-417-432>.

Development and evaluation of consumer properties of a fermented plant-based beverage

Galina V. Posnova, Natalia G. Ivanova*, Karina A. Panchuk

*K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management
(The First Cossack University), Moscow, Russia;

e-mail: n.ivanova@mgutm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3878-6355>

Article info

Received
25.12.2025;

received
in revised form
28.04.2026;

accepted
25.05.2026

Key words:

plant-based fermented
beverage,
antioxidant beverage,
probiotics,
carrot,
rose hips,
apricot kernel flour,
wheat germ oil

Abstract

In response to the growing demand for functional foods, "LactoZen", a fermented plant-based beverage with antioxidant and probiotic properties, has been developed. The product is based on an almond beverage made by grinding almonds pre-soaked in water and then filtering the resulting suspension. To ensure antioxidant activity and increase protein and dietary fiber content, carrot and rosehip powder, wheat germ oil, and defatted apricot kernel flour have been added to the fermented beverage. The addition of apple pectin increases the beverage's dietary fiber content and helps stabilize its texture. Fermentation of the almond beverage has been carried out using a commercial sample of the dry starter culture "Yogurt," which includes pure cultures of *Streptococcus salivarius ssp. thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*, and *Lactobacillus casei* at a concentration of 0.2 % of the beverage's weight. The developed production technology includes the stages of almond beverage preparation, hydration of fortifying additives, homogenization, pasteurization, fermentation, and aseptic packaging. The finished fermented beverage is characterized by a uniform creamy color with a slight orange tint and a harmonious flavor with a soft sourness from fermentation, complemented by sweet notes of almond and a light fruity hint of rosehip. The aroma combines lactic and nutty aromas with subtle herbal notes. The consistency is smooth and moderately viscous, which overall ensures a pleasant consumer experience. The nutritional value of a 200 g serving of the developed beverage "LactoZen" is 4.2 g protein, 14.2 g fat, 4.7 g carbohydrates, 73.6 mcg vitamin A, 10.1 mg vitamin C, and 11.4 mg vitamin E, with an energy value of 163 kcal. The product is recommended for the prevention of oxidative stress, strengthening the immune system and supporting intestinal microbiota, especially for vegetarians, people with lactose intolerance and healthy eating advocates.

For citation

Posnova, G. V. et al. 2026. Development and evaluation of consumer properties of a fermented plant-based beverage. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 417–432. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-417-432>.

Введение

Современные тенденции в питании отражают рост интереса к функциональным продуктам, которые не только удовлетворяют базовые потребности в энергии и пищевых веществах, но и оказывают положительное воздействие на здоровье, включая антиоксидантную защиту, укрепление иммунитета и улучшение работы желудочно-кишечного тракта (Семелева и др., 2025; Поснова и др., 2024).

Высокоактивный образ жизни большинства современного населения России приводит к необходимости коррекции питания и увеличению в рационе доли продуктов, которые можно употреблять в качестве быстрого перекуса. Отмечается, что с учетом требований здорового образа жизни такие перекусы должны сочетать в себе целый ряд свойств: быть внешне привлекательными, обладать хорошими вкусовыми свойствами, иметь удобную форму и упаковку для употребления в нестандартных условиях и обладать функциональными свойствами (Макушева и др., 2024; Иванова и др., 2025).

Среди напитков функциональной направленности можно выделить кисломолочные продукты, безалкогольные напитки на растительной основе и напитки чайные. Кисломолочные продукты, изготовленные на основе молока и вторичного молочного сырья, наиболее широко представлены на рынке напитков (Филиппова и др., 2023). Ассортимент таких напитков широк, состав достаточно разнообразен и, в целом, отвечает современным запросам потребителей. Применение в составе напитков сыворотки и пахты позволяет обеспечить максимальную экономию молочного сырья, повысить эффективность производства и одновременно в большей мере сохранить органолептический профиль готовой продукции (Способ производства..., 2011; Филиппова и др., 2023; Ферментированный напиток..., 2002). Эти продукты не подвергаются дополнительной термической обработке, в среднем содержат 1×10^7 КОЕ молочнокислых микроорганизмов и 1×10^4 дрожжевых клеток и относятся к группе пробиотических пищевых продуктов. Вкус и аромат таких продуктов формируется в процессе ферментации молочного сырья разнообразными штаммами микроорганизмов, увеличивающими кислотность продукта, продуцирующими органические кислоты и комплекс летучих соединений (спирты, альдегиды, кетоны, сложные эфиры и гетероциклические соединения), формирующих аромат и вкус готовой продукции (Епишкина и др., 2021).

Также пользуются спросом молочно-растительные ферментированные напитки с внесением разнообразного растительного сырья (Gonçalves et al., 2025). Плодово-ягодное сырье, например, клюква, черника, облепиха, черноплодная рябина в составе напитка способствует формированию привлекательных внешнего вида и вкусовых свойств. Пюре из фруктов, продукты переработки топинамбура и цикория придают сладковатый вкус, улучшают аромат и увеличивают содержание пищевых волокон. Чайные экстракты формируют оригинальные вкусовые свойства, аромат и цвет напитков. В результате напитки, содержащие разнообразное растительное сырье, дополнительно приобретают антиоксидантные свойства и более длительный срок годности благодаря высокому содержанию органических кислот, витаминов С, Е, фенольных, полициклических соединений и антоцианов (Филиппова и др., 2023; Донская и др., 2018; Донская и др., 2019).

Таким образом, традиционные кисломолочные продукты являются наиболее развитой отраслью ферментированных напитков с пробиотическими и антиоксидантными свойствами, однако они недоступны для вегетарианцев, лиц с непереносимостью лактозы или аллергией на молочный белок, что стимулирует разработку ферментированных напитков на основе растительных альтернативных заменителей.

При оценке рынка растительных напитков с пробиотическими свойствами необходимо выделить три основных направления их развития:

- напитки на основе орехового сырья с высоким содержанием белков и жиров (Тимкачев и др., 2024);
- напитки на основе зернового сырья, богатого крахмалистыми веществами (Епишкина и др., 2021);
- напитки на основе сокового сырья и отходов сокового производства (Конарбаева и др., 2018; Андрианова, 1997).

Напитки двух первых направлений характеризуются не свойственным для традиционных кисломолочных продуктов вкусом, часто не обладают пробиотическими свойствами и пищевой ценностью, отличающейся от молочных продуктов, что снижает полезное воздействие на организм человека. Напитки на основе сокового сырья зачастую в связи с малой долей сока в составе не имеют значимого воздействия на организм человека, не обладают про- и пребиотическими свойствами и содержат многочисленные добавки, увеличивающие массовую долю простых углеводов, вносимых для обеспечения привлекательного вкуса продукта.

Напитки чайные в своем составе не содержат про- и пребиотиков, однако обладают выраженными антиоксидантными свойствами благодаря биологически активным веществам, характерным для начального растительного сырья, а также сокращенной продолжительности приготовления. Например, применение экстрактов чая и кофе в напитках по способу Р. Д. Вуд ускоряет и упрощает процесс их производства (Ферментированный напиток..., 2002). Из напитков, наиболее богатых антиоксидантами, следует отметить

напитки, содержащие экстракты шиповника, вербены лимонной, чайного гриба, мате и иван-чая. Они характеризуются повышенным содержанием флавоноидов и фенольных кислот, среди которых кверцетин и его производные, рутин, мирицетин и его гликозиды, антоцианы, феруловая, галловая и другие кислоты (Suna et al., 2019; Веснина, 2021; Яшин и др., 2021).

Достоверно известно, что окислительный стресс на фоне общего напряжения организма человека, вызванный избыточным образованием свободных радикалов, ассоциирован с развитием хронических заболеваний – атеросклероза, диабета и онкологических патологий (Щербакова и др., 2022). Антиоксиданты, включая витамины А, С, Е и полифенолы, нейтрализуют свободные радикалы, снижая риск этих состояний. Пробиотики, к которым относятся и молочнокислые бактерии, поддерживают баланс микробиоты кишечника, улучшая пищеварение, уровень доступности витаминов и микроэлементов пищи, и, как следствие, повышают способность организма человека сопротивляться внешним инфекциям (Щербакова и др., 2022).

Таким образом, напитки, изготовленные на основе растительного сырья, обогащенные антиоксидантами и пробиотиками, представляют собой перспективный сегмент функционального питания, сочетая высокую пищевую ценность с потребительской привлекательностью.

В качестве основы для разработки нового ферментированного напитка был выбран растительный миндальный напиток благодаря нейтральному вкусу, высокому содержанию витамина Е, магния и ненасыщенных жирных кислот, а также технологической пригодности для ферментации (Fioravante et al., 2017). Для усиления антиоксидантных свойств в рецептуру включены порошок моркови (источник β -каротина), порошок шиповника (витамин С), масло зародышей пшеницы (витамин Е) и обезжиренная мука из абрикосовой косточки, повышающая содержание белка и клетчатки.

Материалы и методы

С целью подбора ингредиентов проведен анализ литературных данных по химическому составу и функциональным свойствам 12 растительных источников антиоксидантов: моркови, шиповника, тыквы, облепихи, черной смородины, клюквы, абрикосовой косточки, зародышей пшеницы, грецкого ореха, льняного семени, черного перца и куркумы. Критерии отбора включали: содержание антиоксидантов (витаминов А, С, Е, полифенолов), доступность сырья, его стоимость, органолептические характеристики и технологическая пригодность.

Основу растительного напитка готовили в лабораторных условиях. Сырой миндаль замачивали в прокипяченной воде при комнатной температуре в течение 1 ч для активации собственных ферментов и облегчения очистки от кожуры. После замачивания миндаль очищали, промывали и измельчали с добавлением воды в соотношении 1 : 2 по массе. Затем суспензию фильтровали через сито с размером ячеек 0,2 мм для отделения жмыха. Полученный миндальный напиток подвергали пастеризации при температуре 85 ± 2 °С в течение 30 с для уничтожения патогенной микрофлоры, быстро охлаждали до температуры 20 ± 2 °С и хранили при температуре 4 ± 2 °С до использования, но не более 12 ч.

Подготовку обогащающих добавок (порошков моркови и шиповника, обезжиренной муки из абрикосовой косточки) осуществляли путем их измельчения в ножевой мельнице до размера частиц 0,3–0,5 мм, оптимальном для обеспечения однородной консистенции при смешивании с миндальным напитком.

Яблочный пектин смешивали с водой температурой 20 ± 2 °С в соотношении 1 : 5 по массе и выдерживали при этой температуре в течение 20 мин до полного набухания и активации гелеобразующих свойств.

Для ферментации изготовленного миндального напитка использовали промышленные образцы сухих бактериальных заквасок "Кефир домашний", "Биокефир", "Биоюгурт домашний" (ТМ "Самосквашино", ООО "Фуд Сервис", г. Москва, Россия) и "Йогурт" (ТМ Oursson, ООО "ОПСОН" г. Москва, Россия), содержащих следующие чистые культуры микроорганизмов:

- "Кефир домашний" – *Streptococcus salivarius* ssp. *thermophiles*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, *Bifidobacterium bifidum*, *Bifidobacterium longum*, *Bifidobacterium adolescentis*, *Bifidobacterium animalis*, *Lactobacillus acidophilus*, *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*, *Propionibacterium freudenreichi*;
- "Биокефир" – *Streptococcus salivarius* ssp. *thermophiles*, *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *cremoris*, *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar *diacetylactis*, *Kluyveromyces marxianus* subsp. *marxianus*;
- "Биоюгурт домашний" – *Streptococcus salivarius* ssp. *thermophiles*, *Bifidobacterium bifidum*, *Bifidobacterium longum*, *Bifidobacterium adolescentis*, *Bifidobacterium animalis*, *Lactobacillus acidophilus*, *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*, *Propionibacterium freudenreichi*, *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *cremoris*, *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar *diacetylactis*, *Kluyveromyces marxianus* subsp. *marxianus*;
- "Йогурт" – *Streptococcus salivarius* ssp. *thermophiles*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, *Lactobacillus casei*.

Концентрация живых микроорганизмов в образцах заквасок составляла не менее 1×10^9 КОЕ/г. Выбор перечисленных заквасочных культур обусловлен способностью штаммов микроорганизмов эффективно ферментировать растительные субстраты и обеспечивать интенсивное кислотонакопление.

Интенсивность кислотонакопления определяли по изменению титруемой кислотности растительного субстрата, в качестве которого выступал изготовленный миндальный напиток, в процессе ферментации в термостате при температуре 37 ± 1 °C в течение 420 мин.

Для оценки эффективности работы заквасочных культур в миндальном напитке его пастеризовали и вносили промышленные образцы сухих бактериальных заквасок "Кефир домашний", "Биокефир", "Биоюгurt домашний" и "Йогурт" из расчета 0,2 г на 100 мл миндального напитка, что обеспечивало оптимальную скорость ферментации и достижение целевого уровня кислотности 50–70 °Т. Массу перемешивали 1–2 мин для равномерного распределения микроорганизмов, разливали в предварительно простерилизованные емкости объемом 200 мл и помещали в термостат. Отбор проб для определения кислотности осуществляли каждые 30 мин.

По прошествии 420 мин ферментации проводили отбор проб для определения жизнеспособности микроорганизмов, которую оценивали методом микрокопирования с предварительной окраской мазков метиленово-синим и по Грамму.

Для приготовления контрольного и опытных образцов ферментированных напитков сухую бактериальную закваску "Йогурт" вносили в молоко коровье пастеризованное с массовой долей жира 3,2 % (образец 1, контрольный), приготовленный пастеризованный миндальный напиток (образец 2) или предварительно гомогенизированную смесь пастеризованного миндального напитка и обогащающих добавок – порошков моркови и плодов шиповника и обезжиренной муки из абрикосовой косточки в различном сочетании в общем количестве 2,0 % от массы готового продукта (образцы 3, 4 и 5). В образец 6 также было внесено масло зародышей пшеницы в количестве 2,0 % к массе растительной смеси для коррекции жирнокислотного состава продукта и повышения его питательных свойств и добавлен яблочный пектин для стабилизации консистенции и предотвращения расслоения продукта. Рецептуры контрольного и опытных образцов ферментированных напитков представлены в табл. 1.

Таблица 1. Рецептуры контрольного и опытных образцов ферментированных напитков

Table 1. Recipes for control and experimental samples of fermented beverages

Наименование сырья	Расход сырья для приготовления образцов ферментированных напитков					
	Образец 1 (контрольный)	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5	Образец 6
Молоко цельное жирностью 3,2 %, мл	100,0	–	–	–	–	–
Миндальный напиток, мл	–	100,0	98,0	98,0	97,5	95,0
Закваска бактериальная сухая "Йогурт", г	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Порошок моркови, г	–	–	2,0	–	1,0	1,0
Порошок шиповника, г	–	–	–	2,0	0,5	0,5
Обезжиренная мука из абрикосовой косточки, г	–	–	–	–	1,0	1,0
Масло зародышей пшеницы, г	–	–	–	–	–	2,0
Пектин яблочный, г	–	–	–	–	–	0,5

На рис. 1 представлена подробная схема приготовления опытных образцов с указанием этапов, условий и контролируемых параметров. Смесь миндального напитка и обогащающих добавок гомогенизировали в течение 3–5 мин при температуре 40 ± 1 °C для равномерного распределения компонентов и предотвращения расслоения. Однородность эмульсии подтверждали отсутствием видимого расслоения, начальное значение pH смеси составляло 6,0–6,5.

По окончании ферментации готовые образцы охлаждали до температуры 5 ± 1 °C для замедления микробиологических процессов и стабилизации органолептических свойств продукта, связанного с расширением вкусовых и ароматических профилей. Органолептические показатели готового продукта оценивали в соответствии с ГОСТ 31986-2012¹ при температуре 7 ± 1 °C по 5-балльной шкале с привлечением дегустационной комиссии из 10 человек с общей максимальной суммой баллов 25.

¹ ГОСТ 31986-2012. Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/54760/?ysclid=mq6jd6l738383865575>.

У готовых образцов ферментированных напитков оценивали:

- внешний вид (5 баллов) по однородности, наличию отделившейся сыворотки и дефектов (трещин и пузырьков на поверхности, характеризующих нарушения технологии приготовления),
- цвет (5 баллов) по степени равномерности и соответствию вносимым в продукт обогащающим добавкам,
- вкус (5 баллов) и запах (5 баллов) по сбалансированности и чистоте кисломолочного вкуса и запаха, соответствующим основе продукта и обогащающим добавкам, отсутствию горечи и других посторонних вкусов и запахов,
- консистенцию (5 баллов) по густоте, текучести, однородности сгустка, отсутствию крупитчатости и расслоения на фракции.

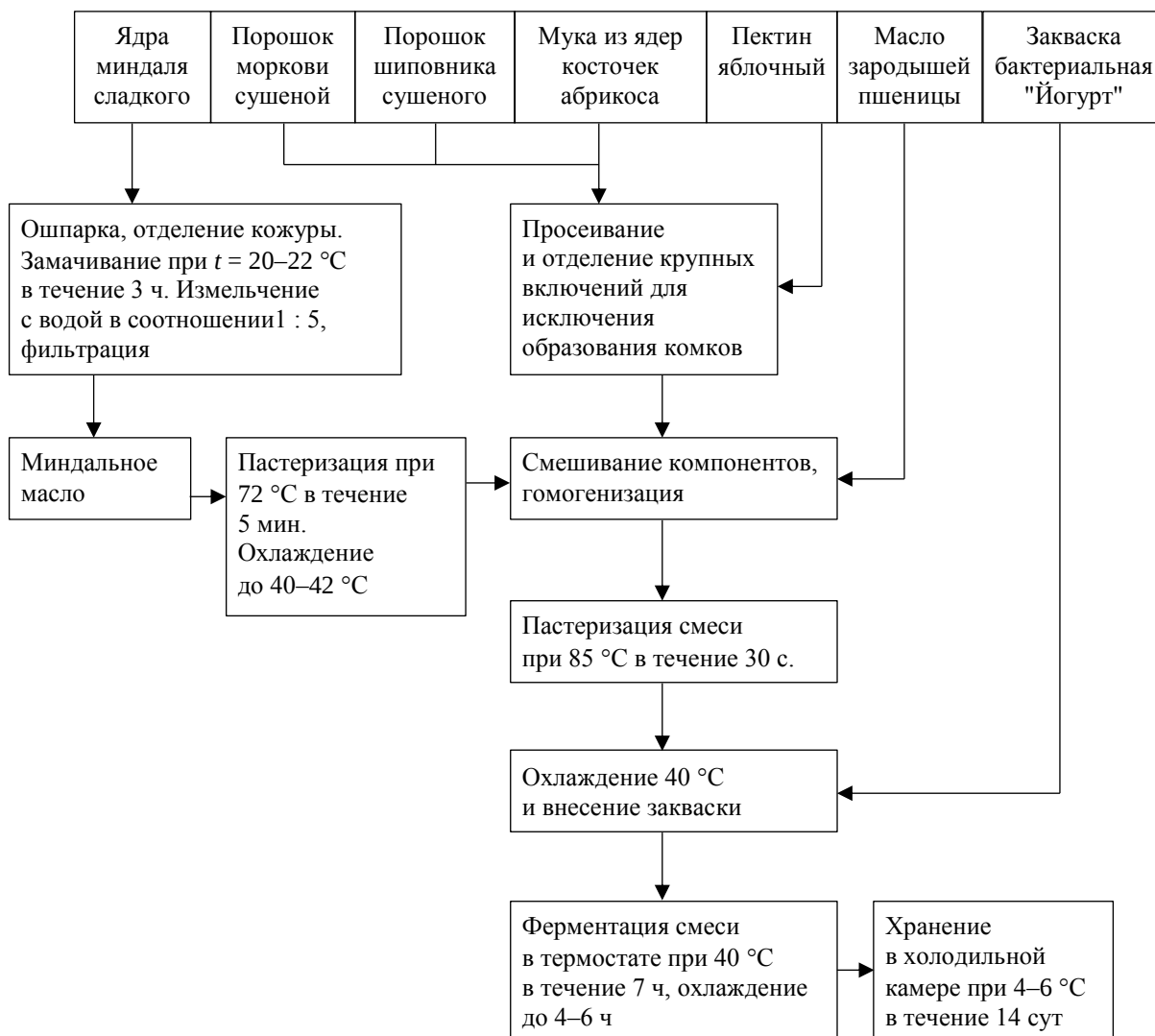


Рис. 1. Схема приготовления опытных образцов ферментированного растительного напитка
Fig. 1. Scheme for the preparation of experimental samples of fermented plant-based beverage

Оценка физико-химических показателей контрольного и опытных образцов ферментированных напитков включала определение титруемой кислотности и содержания сухих веществ и производилась по ГОСТ Р 54669, ГОСТ 6687.4, ГОСТ 6687.2, ГОСТ 33977² соответственно.

² ГОСТ Р 54669. Молоко и продукты переработки молока. Методы определения кислотности. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/52065/?ysclid=mq6ji9em8o325593537> ; ГОСТ 6687.4. Напитки безалкогольные, квасы и сиропы. Методы определения кислотности. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/12154/?ysclid=mq6jjn8dz7441868806> ; ГОСТ 6687.2. Продукция безалкогольной промышленности. Методы определения сухих веществ. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/19321/?ysclid=mq6jkkp0t675055595> ; ГОСТ 33977. Продукты переработки фруктов и овощей. Методы определения общего содержания сухих веществ. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/64328/?ysclid=mq6jllwuqs6761207041>.

Вязкость напитков определяли на приборе СТ-2. Использовали индентор "Шарик 15" со скоростью перемещения –1 мм/с на глубину 4 см с ограничением предельной нагрузки 4 кг при температуре 7 ± 1 °С.

Пищевую ценность изготовленных напитков определяли расчетным методом с использованием справочных таблиц химического состава сырья³.

Результаты и обсуждение

Миндальный напиток выбран как основа ферментированного напитка на растительной основе благодаря высокому содержанию витамина Е (7 мг/100 мл), магния (30 мг/100 мл) и нейтральному вкусу, обеспечивающему совместимость с обогащающими добавками.

Химический состав обогащающих добавок, применявшихся в исследовании для придания напитку антиоксидантных свойств, представлен в табл. 2.

Таблица 2. Витаминный состав обогащающих добавок⁴
Table 2. Vitamin composition of fortifying supplements

Наименование обогащающей добавки	Содержание в 100 г обогащающей добавки			
	Витамин А, мкг	Витамин С, мг	Витамин Е, мг	β-каротин, мг
Порошок моркови	800,0	5,0	0,5	12,0
Порошок шиповника	434,0	650,0	1,7	–
Обезжиренная мука из абрикосовой косточки	–	–	2,0	–
Масло зародышей пшеницы	–	–	150,0	–

Миндаль в напитке за счет содержания водорастворимых веществ (белков, жиров, углеводов, минеральных веществ и витаминов) в количестве 4,4–4,5 % будет основным источником питания для микроорганизмов. Порошок моркови благодаря высокому содержанию β-каротина – эффективный источник провитамина А. Порошок шиповника с повышенным содержанием витамина С и масло зародышей пшеницы как источник витамина Е обеспечивают антиоксидантную активность продукта. Обезжиренная мука из абрикосовой косточки усиливает пищевую ценность напитка за счет повышенного содержания белка и клетчатки. Таким образом, анализ химического состава обогащающих добавок подтвердил их высокую функциональную ценность и целесообразность включения в состав разрабатываемого напитка.

Следующим этапом исследования являлась оценка возможности ферментации растительного субстрата заквасочными культурами, применяемыми в производстве кисломолочных напитков. Для этого изготовленный в лабораторных условиях миндальный напиток сквашивали промышленными образцами сухих заквасок – "Кефир домашний", "Биокефир", "Биойогурт домашний" и "Йогурт" с разным набором микроорганизмов.

При оценке эффективности применения промышленных образцов сухих заквасок для приготовления напитка на растительной основе отмечено, что итогового значения титруемой кислотности, максимально близкой к оптимальному значению 50–70 °Т, по прошествии 7 ч достигал только образец на закваске "Йогурт", кислотность которого составляла 50,2 °Т. Ферментация с применением других образцов заквасок оказалась неэффективна, поскольку кислотность образцов с внесением заквасок "Кефир домашний", "Биокефир" и "Биойогурт домашний" составляла только 12,5 °Т, 10,2 °Т и 31 °Т соответственно.

Далее оценивали жизнеспособность микроорганизмов промышленных образцов сухих заквасок в изготовленном миндальном напитке методом микроскопирования. Было отмечено высокое содержание погибших клеток микроорганизмов при применении образцов заквасок "Кефир домашний" и "Биокефир", что объясняет низкие значения кислотности в ферментированных образцах напитка (рис. 2). При окраске проб ферментированных напитков по Грамму идентифицированы все штаммы микроорганизмов, характерные для применяемых заквасок, однако наибольшее количество живых микроорганизмов, их скопления и признаки размножения наблюдались при использовании закваски "Йогурт".

Полученные данные свидетельствуют о гибели части микроорганизмов в процессе ферментации в связи с недостаточностью в миндальном напитке пищевых веществ, что впоследствии приводит к получению ферментированных продуктов с недостаточной кислотностью и низкими потребительскими свойствами. В связи с этим возникает необходимость коррекции химического состава растительного субстрата, заключающаяся в увеличении содержания сложных белков и простых углеводов для обеспечения нормальных условий развития молочнокислых бактерий.

Поскольку чистые культуры *Streptococcus salivarius ssp. thermophilus* и *Lactobacillus casei* имеют оптимальную температуру развития $42,5 \pm 2,5$ °С, а для *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*

³ Скурихин И. М., Тутельян В. А. Таблицы химического состава и калорийности российских продуктов питания : справочник. М. : ДеЛи принт, 2007. 275 с.

⁴ Таблицы калорийности продуктов / Мой здоровый рацион. URL: https://health-diet.ru/table_calorie/ (дата обращения: 20.10.2025).

допустима максимальная температура культивирования $37,5 \pm 2,5$ °С, изготовление экспериментальных образцов ферментированных напитков проводили при температуре $41 \pm 1,0$ °С.

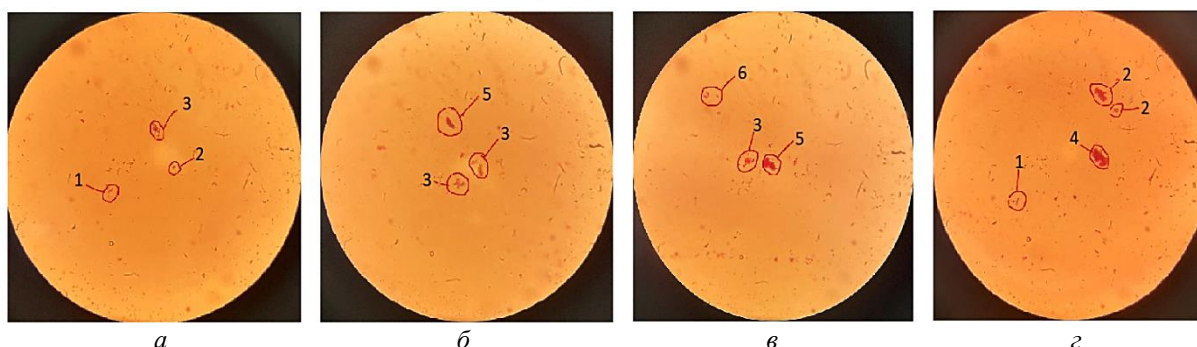


Рис. 2. Результаты микропирования заквасочной микрофлоры, окрашенной по Грамму, в ферментированных напитках с применением промышленных образцов сухих заквасок: а – "Кефир домашний"; б – "Биокефир"; в – "Биоюгurt домашний"; г – "Йогurt"). Условные обозначения: 1 – *Streptococcus thermophiles*; 2 – *Lactobacillus bulgaricus*; 3 – *Bifidobacterium bifidum*; 4 – *Lactobacillus casei*; 5 – *Kluyveromyces marxianus*; 6 – *Lactobacillus acidophilus*

Fig. 2. Results of microcopying starter microflora stained by Gram in fermented beverages using industrial samples of dry starters: а – "Kefir domashnij"; б – "Biokefir"; в – "Bioyogurt domashnij"; г – "Yogurt"

В дальнейшем исследовании при разработке рецептуры ферментированного напитка в состав опытных образцов в качестве источника простых сахаров вносили порошок моркови в количестве 1–2 г (образцы 3, 5 и 6) и порошок шиповника в количестве 0,5–2 г (образцы 4, 5 и 6) на 100 г готового продукта. В качестве дополнительного источника белка в образцы 5 и 6 вносили обезжиренную муку из абрикосовой косточки в количестве 1 г. В образец 6 дополнительно было внесено масло зародышей пшеницы в количестве 2 г как источник антиоксидантов и яблочный пектин для стабилизации консистенции (0,5 г). Контрольным выступал образец 1 на коровьем молоке без внесения добавок.

Внешний вид образцов полученных ферментированных напитков контрольного и опытных образцов представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид образцов ферментированных напитков контрольного и опытных образцов
Fig. 3. Appearance of control and experimental fermented beverage samples

Полученные результаты показали, что образец 1 имел тягучую консистенцию с отделившейся сывороткой, белый цвет, ярко выраженный кисломолочный вкус и кисловатый аромат. Образец 2 представлял собой однородную жидкость светло-бежевого цвета с легким ореховым ароматом, мягким миндальным вкусом с кислинкой. Образец 3 характеризовался наличием неоднородной хлопьевидной консистенции с отделившейся сывороткой, неоднородным непривлекательным цветом и неприятным морковно-кислым вкусом, напоминающим испорченный кисломолочный продукт с фруктовым наполнителем, кремовым цветом с оранжевыми вкраплениями, кисловатым ароматом, что привело к его отбраковке. Образец 4 представлял собой однородную жидкость бледно-коричневого цвета, с ореховым ароматом с кислинкой, с выраженным кислым вкусом с привкусом шиповника и сладковатым послевкусием миндаля. Образец 5 имел жидкую консистенцию с отделившейся сывороткой и хлопьями сгустка, бежевый цвет с оранжевыми вкраплениями, слегка кислый, орехово-морковный запах и сильно кислый вкус с привкусом моркови.

На рис. 4 представлена динамика накопления кислотности при ферментации коровьего молока и миндального напитка бактериальной закваской "Йогурт".

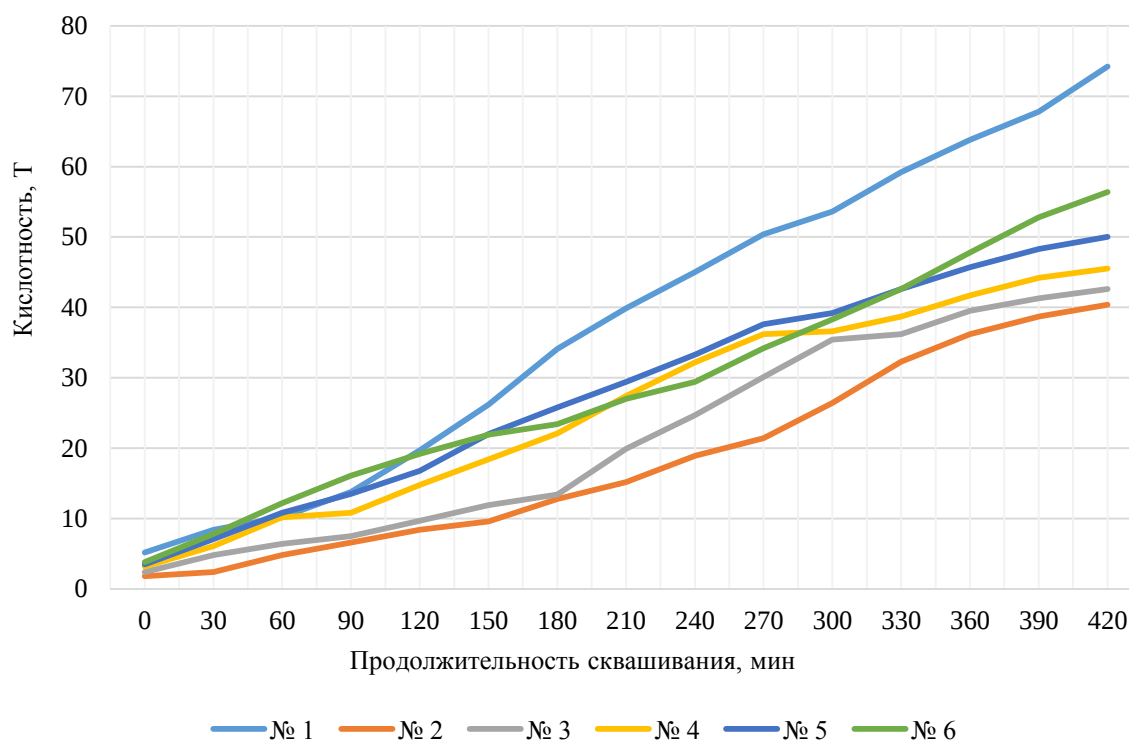


Рис. 4. Динамика накопления кислотности при ферментации коровьего молока и растительного миндального напитка бактериальной закваской "Йогурт"

Fig. 4. Dynamics of acidity accumulation during fermentation of cow's milk and plant-based almond beverage with the bacterial starter "Yogurt"

Данные, представленные на рис. 4, показывают, что минимальное кислотонакопление в процессе ферментации наблюдалось у образца 2 на основе миндального напитка без добавлений, к концу процесса она достигала 40,4 °Т. По сравнению с образцом 2 у образцов 3 и 4 с дополнительным источником сахаров в виде порошков моркови и шиповника кислотонакопление увеличивалось на 5,4 и 12,6 %, однако целевого значения кислотности в 50 °Т они не достигали, составляя соответственно 42,6 °Т и 45,5 °Т. Образцы 5 и 6 с дополнительным внесением источника белка за установленный период ферментации достигали целевого значения кислотности. У образца 5 при этом кислотонакопление интенсифицировалось на 23,7 % больше, чем у образца 2, а у образца 6 с дополнительным внесением пектина – на 39,6 %. Следует отметить, что по сравнению с контрольным образцом 1 напитка на основе коровьего молока образцы 5 и 6 имели более низкую кислотность на 32,6 и 23,7 %, составив 24,2 °Т и 17,8 °Т соответственно.

При оценке органолептических показателей качества образцов (рис. 5) отмечены значительные различия в консистенции, аромате, вкусе и цвете полученных продуктов.

Органолептическая оценка показала, что образец 6 получил наивысшую среднюю оценку в 24 балла. Внешний вид характеризовался однородным кремовым цветом с легким оранжевым оттенком, обусловленным

порошком моркови. Вкус был гармоничным, с мягкой кислинкой от ферментации, дополненной сладковатыми нотами миндаля и легким фруктовым оттенком шиповника. Запах сочетал молочнокислые и ореховые ароматы с тонкими травяными нотами. Консистенция была однородной, умеренно вязкой, без комков или осадка, что обеспечивало приятное потребительское восприятие.

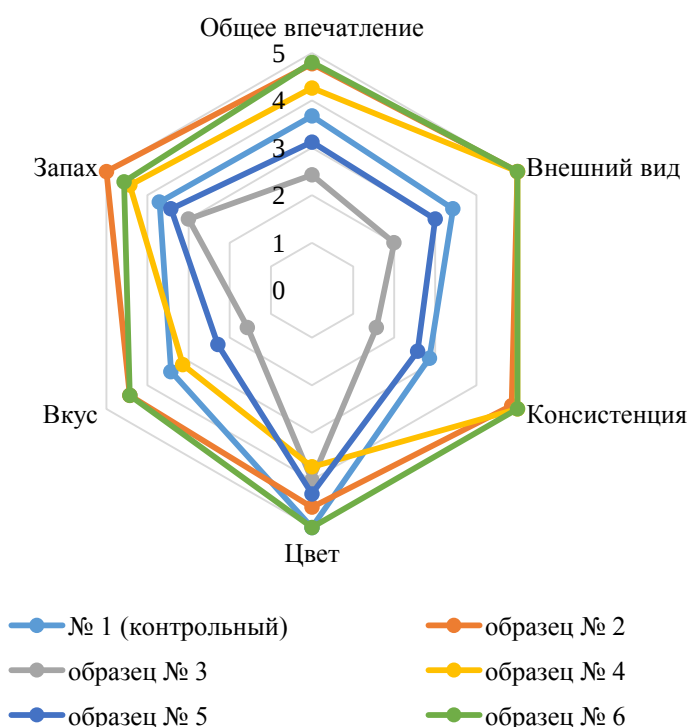


Рис. 5. Профилограмма органолептических характеристик исследуемых образцов ферментированных напитков

Fig. 5. Profilogram of organoleptic characteristics of the studied samples of fermented beverages

Образцы 1 и 2 получили 21,29 и 23,86 балла соответственно, уступая из-за непривлекательного внешнего вида и менее выраженного вкусового профиля. Образцы 4 и 5 показали общие оценки в 18,43 и 15,58 баллов соответственно, что связано с сильно кислым вкусом и неоднородной консистенцией.

Таким образом, разработана рецептура ферментированного напитка "ЛактоДзен" на основе миндаля с внесением сухой бактериальной закваски "Йогурт" (0,2 %), порошков моркови (0,95 %) и шиповника (0,48 %), обезжиренной муки из абрикосовой косточки (0,95 %), пектина яблочного (0,48 %) и масла зародышей пшеницы (1,91 %).

Одной из поставленных задач являлось создание продукта, максимально приближенного по консистенции и потребительским свойствам традиционным кисломолочным продуктам, поэтому в дальнейшем проводили оценку вязкости и органолептических показателей качества продукта.

Анализ вязкости ферментированного напитка на растительной основе "ЛактоДзен" проводили в сравнении с питьевым йогуртом классическим с массовой долей жира 1,6 % ТМ "Фругурт" (АО "Вимм-Билль-Данн", Россия) и миндальным напитком с массовой долей жира 1,5 % ТМ "Planto Barista" (АО "ЭЙЧ ЭНД ЭН", Россия). Результаты определения вязкости исследуемых напитков представлены на рис. 6, оценка органолептических показателей напитков – на рис. 7.

Как показывают данные, представленные на рис. 6, наименее вязким является миндальный напиток. Классический питьевой йогурт имеет вязкость в 1,09 раз больше, а разработанный напиток "ЛактоДзен" – в 1,9 раза больше, что вероятно обусловлено внесенным в его состав пектином, способствующим образованию в продукте пространственной структуры с образованием водородных мостиков, а благодаря низкой кислотности продукта пектин препятствует агрегации белка в продукте, чем корректирует его консистенцию.

Анализ дегустационной оценки образцов показал, что образец миндального напитка ТМ "Planto Barista" у респондентов получил более низкую оценку (4,1 балла) из-за нейтрального вкуса и отсутствия выраженного аромата. Образец классического питьевого йогурта был оценен выше (4,4 балла), но уступал разработанному напитку "ЛактоДзен" из-за менее насыщенного вкуса и аромата, обусловленного отсутствием

добавок в его составе. Полученные данные свидетельствуют о высоких потребительских свойствах разработанного ферментированного миндального напитка.

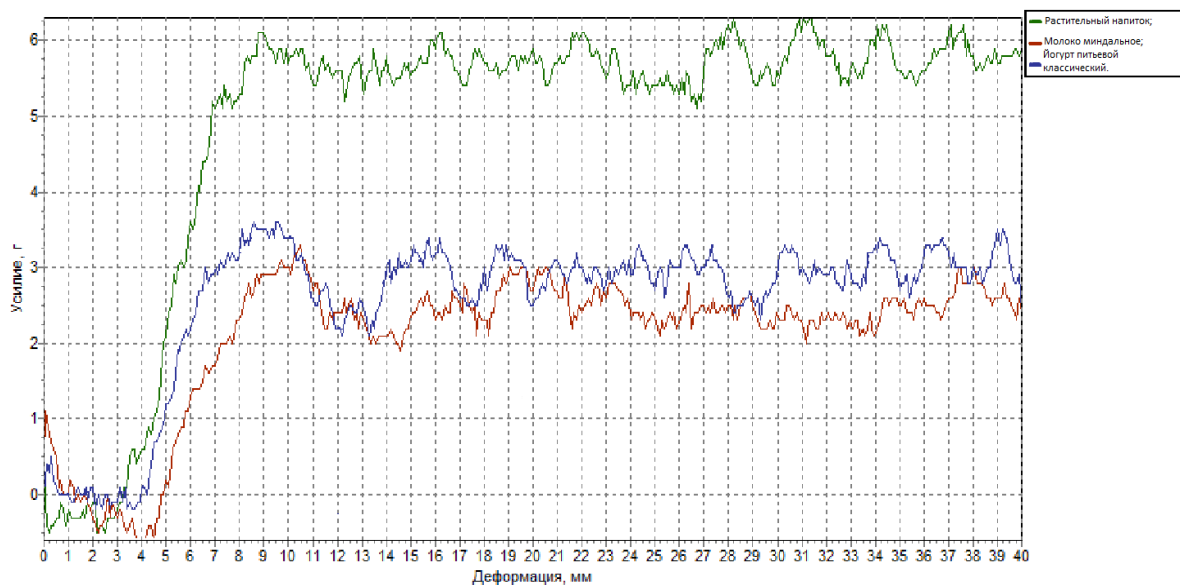


Fig. 6. Viscosity of the beverage "LactoZen" compared to yogurt and almond beverage

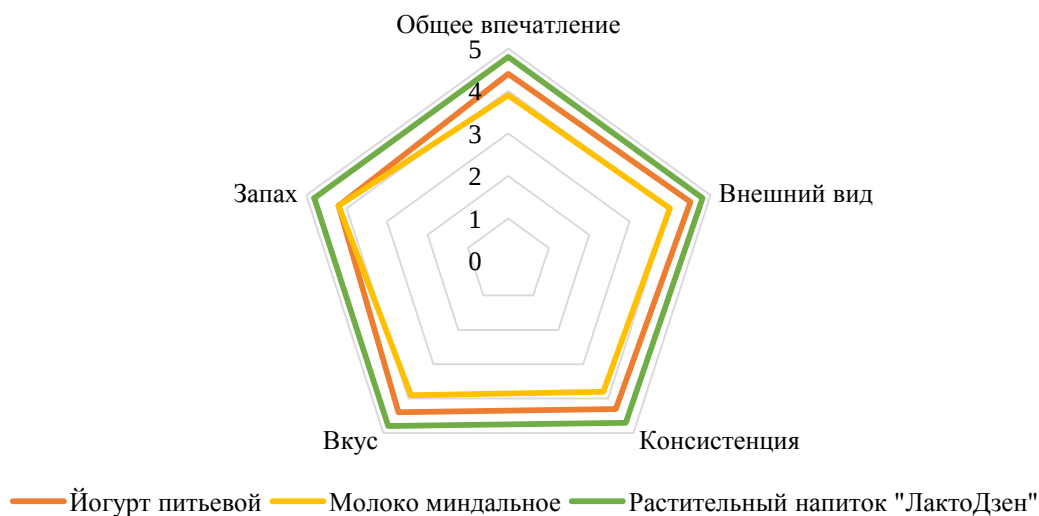


Fig. 7. Organoleptic properties of the beverage "LactoZen" compared to yogurt and almond drink

В табл. 3 представлены результаты расчетной оценки пищевой ценности исследуемых напитков.

Таблица 3. Пищевая ценность порции напитков (200 мл)
Table 3. Nutritional value of a serving of beverages

Наименование нутриента	Наименование напитка		
	Миндальный напиток ТМ "Planto Barista"	Йогурт питьевой классический ТМ "Фругурт"	Ферментированный растительный напиток "ЛактоДзен"
Белки, г	1,3	5	4,2
Жиры, г	3,1	3,2	14,2
Углеводы общие, г	1,3	3,5	4,7

Витамин А, мкг	–	22	73,602
β-каротин, мг	–	0,01	0,812
Витамин С, мг	–	0,6	10,075
Витамин Е, мг	0,12	0,07	11,382
Витамин РР, мг	0,178	1,4	1,462
Цинк, мг	0,154	0,4	0,403
Селен, мкг	–	2	0,779

Расчет пищевой ценности напитков показал, что порция разработанного напитка "ЛактоДзен" при энергетической ценности 163,4 ккал содержит 4,2 г белка, что в 3,2 раза превосходит растительный миндальный напиток и в 1,16 раз ниже, чем в классическом питьевом йогурте. Напиток "ЛактоДзен" значительно превосходит растительный миндальный напиток и питьевой йогурт по содержанию жира в 4,6 и 4,2 раза соответственно. Содержание углеводов в разработанном напитке выше в 3,6 и 1,3 раза, однако это значение сопоставимо с йогуртами с фруктовыми добавками, при этом в составе разработанного напитка присутствуют сахара только природного происхождения.

Анализируя антиоксидантный потенциал отмечено, что в порции напитка "ЛактоДзен" содержится: витамин А – 73,602 мкг, что соответствует 8,18 % от рекомендуемой суточной потребности (РСП), β-каротин – 0,812 мг (16,24 % РСП), витамин С – 10,075 мг (10,08 % РСП), витамин Е – 11,382 мг (75,88 % РСП), витамин РР – 1,462 мг (7,31 % РСП), цинк – 0,403 мг (3,36 % РСП) и селен – 0,779 мкг (1,42 % РСП). Высокое содержание витамина Е, достигнутое преимущественно за счет масла зародышей пшеницы и миндаля, подчеркивает выраженные антиоксидантные свойства напитка, способствующие нейтрализации свободных радикалов и защите клеток от окислительного стресса. β-каротин (из порошка моркови) и витамин С (из порошка шиповника) дополняют антиоксидантный эффект, поддерживая иммунную систему и здоровье кожи. Витамин РР, цинк и селен, хотя и присутствуют в меньших количествах, способствуют метаболическим процессам и антиоксидантной защите.

На основании проведенных исследований разработана технология производства ферментированного напитка на растительной основе, отличающаяся высокой воспроизводимостью и адаптированностью к промышленным условиям, которая заключается в следующем. На первом этапе миндальный напиток, подготовленный по стандартной технологии, нагревают до 40 ± 1 °С в смесителе с мешалкой для предотвращения оседания частиц, постепенно добавляют набухший яблочный пектин, тщательно перемешивают в течение 5 мин до полного растворения. Затем в смесь вносят порошок моркови, порошок шиповника, обезжиренную муку из абрикосовой косточки и масло зародышей пшеницы, продолжая перемешивание в течение 10 мин для равномерного распределения компонентов. Полученную смесь подвергают гомогенизации в роторно-статорном гомогенизаторе при давлении 15 МПа и температуре 55 ± 5 °С и пастеризуют при температуре 85 ± 1 °С в течение 30 с в пластинчатом теплообменнике. В теплообменнике с водяным охлаждением смесь охлаждают до 40 ± 1 °С и вносят в нее сухую закваску "Йогурт", включающую чистые культуры *Streptococcus salivarius ssp. thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* и *Lactobacillus casei* в количестве 0,2 % от массы смеси. Смесь перемешивают в течение 3 мин для равномерного распределения закваски, затем переливают в ферментационные емкости. Ферментация проводится в термостате при температуре 41 ± 1 °С в течение 6–8 ч до достижения титруемой кислотности 50 °Т. Далее готовый продукт охлаждают до 4 ± 1 °С в течение 2 ч и фасуют в светонепроницаемые полимерные бутылки в асептических условиях. Рекомендуемый объем одной порции напитка – 200 мл.

Применение пастеризации миндального напитка при 85 °С будет способствовать удалению посторонней микрофлоры и обеспечит преимущественное развитие микроорганизмов закваски. При соотношении компонентов в соответствии с рецептурой опытного образца 6 применение гомогенизации при давлении 15 МПа и температуре $57,5 \pm 2,5$ °С обеспечивает стабильность эмульсии, предотвращая расслоение жировых компонентов и твердых частиц. Ферментация при 41 ± 1 °С оптимизирует активность пробиотических культур, входящих в состав бактериальной закваски "Йогурт": *Streptococcus salivarius ssp. thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*, *Lactobacillus casei*, обеспечивая достижение целевого показателя кислотности 50 °Т за 6–8 ч. Для упаковки продукта рекомендуется использование светонепроницаемой упаковки с целью предотвращения фотохимического разрушения витаминов А и Е, а асептическая фасовка обеспечивает микробиологическую стабильность продукта. Хранение готового продукта рекомендуется при температуре 5 ± 1 °С в течение не более 14 дней с целью сохранения активности пробиотиков и антиоксидантов.

На новый вид продукта разработан проект нормативно-технической документации. Установленные показатели качества и внешний вид ферментированного напитка на растительной основе "ЛактоДзен" представлены в табл. 4 и на рис. 8.

Таблица 4. Показатели качества разработанного ферментированного напитка на растительной основе "ЛактоДзен"

Table 4. Quality indicators of the fermented plant-based beverage "LactoZen"

Показатель	Значение показателя
Консистенция	Однородная плотная жидкость
Цвет	Бежево-кремовый с вкраплениями
Запах	Орехово-зерновой, приятный, слегка кислый
Вкус	Морковно-зерновой, мягкий, с приятной кислинкой
Титруемая кислотность, °Т	52–60
Активная кислотность, pH	4,2–4,7
Массовая доля сухих веществ, не менее %	12
Концентрация микроорганизмов, не менее КОЕ/г	1×10^9



Рис. 8. Внешний вид разработанного ферментированного напитка на растительной основе "ЛактоДзен"

Fig. 8. Appearance of the fermented plant-based beverage "LactoZen"

Содержание сухих веществ готовой продукции соответствовало типичным значениям для кисломолочных напитков. Приведенные значения кислотности обеспечивали приятный вкус и свидетельствовали о завершении процесса ферментации. Содержание обогащающих добавок в доле сухих веществ составляло около 10 %, что повышало питательную плотность продукта. В целом значения физико-химических показателей напитка обеспечивают стабильность продукта, а напиток "ЛактоДзен" отвечает требованиям рынка функциональных продуктов, сочетая растительную основу, антиоксидантные и пробиотические свойства. Продукт подходит для вегетарианцев, лиц с непереносимостью лактозы и потребителей, ориентированных на здоровое питание. Высокое содержание витамина Е делает его ценным для профилактики окислительного стресса, а пробиотики поддерживают здоровое состояние кишечной микрофлоры.

Перспективной рассматривается разработка новых вкусовых профилей (например, с добавлением ягодных пюре), оптимизация стоимости сырья и продление срока годности за счет натуральных консервантов.

Выводы

В результате проведенного исследования подтверждена целесообразность внесения в растительный ферментированный продукт с антиоксидантными свойствами: порошка моркови в качестве источника β-каротина, порошка шиповника как источника витамина С, масла зародышей пшеницы как источника витамина Е, что обеспечивает антиоксидантную активность продукта, обезжиренной муки из абрикосовой косточки в качестве источника белка, пищевых волокон и гармонизации вкусового профиля и яблочного пектина в качестве стабилизатора консистенции и повышении пищевой ценности напитка.

Установлено, что закваска "Йогурт", содержащая чистые культуры микроорганизмов *Streptococcus salivarius ssp. thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* и *Lactobacillus casei* в количестве 0,2 % к массе напитка, гарантирует эффективное сбраживание растительного субстрата на основе миндального напитка, порошков моркови и шиповника, обезжиренной муки из абрикосовой косточки при температуре 41 ± 1 °С в течение 6–8 ч.

В ходе проведенных исследований установлено, что внесение 0,5 % яблочного пектина в ферментированный напиток на растительной основе в качестве стабилизатора обеспечивает в напитке консистенцию, соответствующую питьевому йогурту, что подтверждается результатами определения вязкости на приборе СТ-2. Также определено оптимальное соотношение порошков моркови и шиповника, масла зародышей пшеницы, обезжиренной муки из абрикосовой косточки, яблочного пектина, равное 2 : 1 : 4 : 2 : 1, при котором готовое изделие отличается наилучшими органолептическими показателями.

По результатам проведенных исследований рекомендовано следующее соотношение компонентов для изготовления ферментированного напитка с антиоксидантными свойствами "ЛактоДзен" на основе миндального напитка: 0,2 % бактериальной закваски, 0,95 и 0,48 % порошков моркови и шиповника, 0,95 % обезжиренной муки из абрикосовой косточки, 0,48 % пектина яблочного и 1,91 % масла зародышей пшеницы. Технологическая схема производства напитка может реализоваться на действующих предприятиях с применением стандартного оборудования.

Таким образом, разработанный напиток на растительной основе "ЛактоДзен" можно рассматривать в качестве источника витаминов А, С, Е и β-каротина, а также характеризующегося антиоксидантными и пробиотическими свойствами. Рекомендуемый объем одной порции напитка – 200 мл. Напиток обладает высокой пищевой ценностью, покрывая 76 % суточной потребности в витамине Е, 10 % в витамине С и 8 % в витамине А, и рекомендован для профилактики окислительного стресса, укрепления иммунитета и поддержки микробиоты кишечника. Полученный продукт в соответствии с требованиями ГОСТ 55577⁵ можно отнести к функциональным продуктам с нанесением на этикетку отличительных знаков "Продукт с высоким содержанием витамина Е", "Источник витаминов А, С и β-каротина", "Без добавления сахарозы, консервантов, красителей", "Не содержит молоко", "Содержит сахара природного происхождения".

Перспективы исследования включают масштабирование производства, расширение ассортимента и дальнейшие исследования биодоступности антиоксидантов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Андрианова Ю. А. Разработка биотехнологии овощных ферментированных напитков с использованием бифидобактерий : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1997. 18 с.
- Веснина А. Д. Разработка функционального напитка на основе культуры чайного гриба для оздоровления населения // Междунар. молодежный конкурс науч. проектов "Стираем границы" : сб. материалов, Москва, 20–21 октября 2021 г. М., 2021. С. 57–62. EDN: DHVZZQ.
- Донская Г. А., Дрожжин В. М., Брызгалина В. В. Напитки кисломолочные с повышенным содержанием сывороточных белков и водорастворимых антиоксидантов // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21, № 3. С. 471–480. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-3-471-480>. EDN: YLAMAX.
- Донская Г. А., Чумакова И. В., Харитонов В. Д., Дрожжин В. М. Инновационные технологии. Молочно-растительный ферментированный напиток // Переработка молока. 2019. № 8(238). С. 6–8. DOI: <https://doi.org/10.33465/2222-5455-2019-8-6-8>. EDN: UATNUO.
- Епишкина Ю. М., Хромова Н. Ю., Кареткин Б. А., Юдин Н. В. [и др.]. Исследование органолептики и состава летучих соединений функциональных напитков на основе энзиматического гидролизатацельнозерновой пшеничной муки, ферментированного лактобактериями // Пищевые технологии и биотехнологии : материалы XVII Всерос. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с междунар. участием, Казань, 20–23 апреля 2021 г. Казань, 2021. С. 67–72. EDN: VIEEHM.
- Иванова Н. Г., Волконская А. А. Технология производства хлебных палочек для питания женщин в периоды прегравидарной подготовки, беременности и лактации // Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 198–209. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-198-209>. EDN: VGNJCU.
- Конарбаева З. К., Баянбай Н. Е., Джанмулдаева А. К., Арапбаева Д. М. [и др.]. Совершенствование технологии производства ферментированных напитков на основе плодово-ягодных соков // International scientific research 2018 : XLI Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 23 ноября 2018 г. Москва, 2018. С. 344–345. EDN: VPVZKW.
- Макушева Д. А., Поснова Г. В. Применение сырья повышенной пищевой ценности при производстве отделочных полуфабрикатов для кондитерских изделий // Поландовские чтения : сб. материалов VI междунар. науч.-практ. молодежной конф., Москва, 5 июня 2024 г. Москва, 2024. С. 107–109. EDN: MWBOOC.

⁵ ГОСТ 55577. Продукты пищевые функциональные. Информация об отличительных признаках и эффективности. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/55874/?ysclid=mq6jpyx21v779222585>.

- Поснова Г. В., Иванова Н. Г. Разработка технологии хлебобулочного изделия пшеницы с повышенной пищевой ценностью. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 3. С. 400–411. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-3-400-411>.
- Семелева Е. В., Плигина Е. В., Лукьянова Т. В. Культура питания в России: между традицией и современностью // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 1(151). DOI: 10.60797/IRJ.2025.151.100. EDN: JKEZYN.
- Способ производства ферментированного напитка : пат. № 2413419 Рос. Федерация / А. Ю. Просеков, И. С. Разумникова, А. В. Крупин, Е. В. Короткая. № 2009134620/10 ; заявл. 15.09.2009 ; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7.
- Тимкачев Д. А., Пузанкова Ю. М., Хромова Н. Ю., Шакир И. В. [и др.]. Оптимизация параметров получения функциональных напитков из миндальной муки с учетом органолептических свойств // Современные достижения биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты. Инновационные биотехнологии природных и синтетических биологически активных веществ. Нарочанские чтения-16 : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., Ставрополь, 21–24 октября 2024 г. Ставрополь, 2024. С. 363–367. EDN: CAVNJY.
- Ферментированный напиток и способ его получения : пат. № 2178648 Рос. Федерация / Р. Д. Вуд, Й. Бэнш, М. Риппштайн. № 97102341/13 : заявл. 13.02.1997 ; опубл. 27.01.2002, Бюл. 3.
- Филиппова А. И. и др. Производство безалкогольных напитков с использованием антиоксидантов (обзор литературы) // Молодой исследователь : материалы 10-й науч. выставки-конференции науч.-техн. и творческих работ студентов. Челябинск, 2023. С. 234–238.
- Щербакова Е. И., Филиппова А. И. Использование антиоксидантов при производстве функциональных напитков (обзор литературы) // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2022. № 5(76). С. 58–60. DOI: 10.33979/2219-8466-2022-76-5-58-60. EDN: BTUVZV.
- Яшин Я. И., Черноусова Н. И., Яшин А. Я. Чаеподобные напитки: химический состав, антиоксидантная активность и их влияние на здоровье человека // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21, № 5. С. 782–788. DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3785>. EDN: DKDLLY.
- Fioravante M. B., Hiane P. A., Braga Neto J. A. Elaboration, sensorial acceptance and characterization of fermented flavored drink based on water // Ciência Rural. 2017. Vol. 47, N 9. Article number: e20151646. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20151646>.
- Gonçalves G. C. V., Catharina Weis C. M. S., Wolff Élide R., Alves V. [et al.]. Vegan fermented drinks as an alternative to milk: Trend or challenge? // Food Science and Engineering. 2024. Vol. 6, Iss. 1. DOI: <https://ojs.wiserpub.com/index.php/FSE/article/view/5396>.
- Katina K., Laitila A., Juvonen R., Liukkonen K.-H. [et al.]. Bran fermentation as a means to enhance technological properties and bioactivity of rye // Food Microbiology. 2007. Vol. 24, Iss. 2. P. 175–186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.07.012>.
- Suna S., Incedayi B., Tamer C. E., Ozcan-Sinir G. [et al.]. Lemon verbena (*Lippia citriodora* Kunth) beverages: Physicochemical properties, contents of total phenolics and minerals, and bioaccessibility of antioxidants // Italian Journal of Food Science. 2019. Vol. 31, Iss. 1. P. 40–53.

References

- Andrianova, Yu. A. 1997. Development of biotechnology for fermented vegetable beverages using bifidobacteria. Abstract of Ph.D. dissertation. Moscow. (In Russ.)
- Vesnina, A. D. 2021. Development of a functional drink based on kombucha culture for public health. Materials of the International Youth Competition of Scientific Projects International *Youth Competition of Scientific Projects "Erasing Borders"*, Moscow, October 20–21, 2021. Moscow, pp. 57–62. EDN: DHVZZQ. (In Russ.)
- Donskaya, G. A., Drozhzhin, V. M., Bryzgalina, V. V. 2018. Fermented milk drinks with increased content of whey proteins and water-soluble antioxidants. *Vestnik of MSTU*, 21(3), pp. 471–480. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-3-471-480>. EDN: YLAMAX. (In Russ.)
- Donskaya, G. A., Chumakova, I. V., Kharitonov, V. D., Drozhzhin, V. M. 2019. Innovative technologies. Milk-vegetable fermented drink. *Milk Branch Magazine*, 8(238), pp. 6–8. DOI: <https://doi.org/10.33465/2222-5455-2019-8-6-8>. EDN: UATNUO. (In Russ.)
- Epishkina, Yu. M., Khromova, N. Yu., Karetkin, B. A., Yudin, N. V. et al. 2021. Proceedings of the XVII All-Russian Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students with International Participation *Food Technology and Biotechnology*, Kazan, April 20–23, 2021. Kazan, pp. 67–72. EDN: VIEEHM. (In Russ.)
- Ivanova, N. G., Volkonskaya, A. A. 2025. Technology of production of breadsticks for nutrition of women during pre-gravid preparation, pregnancy and lactation. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 198–209. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-198-209>. EDN: VGNJCU. (In Russ.)

- Konarbaeva, Z. K., Bayanbaj, N. E., Dzhanmuldaeva, A. K., Arapbaeva, D. M. et al. 2018. Improving the production technology of fermented beverages based on fruit and berry juices. *International Scientific Research* 2018, Moscow, 23 November 2018. Moscow, pp. 344–345. EDN: VPVZKW. (In Russ.)
- Makusheva, D. A., Posnova, G. V. 2024. Use of raw materials with increased nutritional value in the production of finishing semi-finished products for confectionery products. *Poland readings: Collection of materials of the VI international scientific and practical youth conference*, Moscow, June 5, 2024. Moscow, pp. 107–109. EDN: MWBOOC. (In Russ.)
- Posnova, G. V., Ivanova, N. G. 2024. Development of a technology for the production of pita bread with enhanced nutritional value. *Vestnik of MSTU*, 27(3), pp. 400–411. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-3-400-411>. (In Russ.)
- Semeleva, E. V., Pligina, E. V., Lukyinova, T. V. 2025. Food culture in Russia: Between tradition and modernity. *International Research Journal*, 1(151). DOI: 10.60797/IRJ.2025.151.100. EDN: JKEZYN. (In Russ.)
- Prosekov, A. Yu., Razumnikova, I. S., Krupin, A. V., Korotkaya, E. V. 2011. Method for producing a fermented beverage, Russian Federation, Pat. 2413419. (In Russ.)
- Timkachev, D. A., Puzankova, Yu. M., Khromova, N. Yu., Shakir, I. V. et al. 2024. Optimization of parameters for producing functional beverages from almond flour, taking into account organoleptic properties. *Proceedings of the IX Intern. scien. and pract. conf. Modern achievements of biotechnology: Fundamental and applied aspects. Innovative biotechnologies of natural and synthetic biologically active substances. Naroch Readings-16*, Stavropol, October 21–24, 2024. Stavropol, pp. 363–367. EDN: CAVNJY. (In Russ.)
- Wood, R. D., Baensch, J., Rippstein, M. 2002. Fermented beverage and method for producing it, Russian Federation, Pat. 2178648. (In Russ.)
- Filippova, A. I. et al. 2023. Production of soft drinks using antioxidants (literature review). *Proceedings of the 10th scientific exhibition-conference of scientific, technical and creative works of students Young researcher*, Chelyabinsk, May 16–17, 2023. Chelyabinsk, pp. 234–238. (In Russ.)
- Shcherbakova, E. I., Filippova, A. I. 2022. Use of antioxidants in the production of functional drinks (literature review). *Technology and Commodity Science of Innovative Food Products*, 5(76), pp. 58–60. DOI: 10.33979/2219-8466-2022-76-5-58-60. EDN: BTUVZV. (In Russ.)
- Yashin, Ya. I., Chernousova, N. I., Yashin, A. Ya. 2021. Tea-like drinks: Chemical composition, antioxidant activity and their impact on human health. *Sorption and Chromatographic Processes*, 21(5), pp. 782–788. DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3785>. EDN: DKDLLY. (In Russ.)
- Fioravante, M. B., Hiane, P. A., Braga Neto, J. A. 2017. Elaboration, sensorial acceptance and characterization of fermented flavored drink based on water. *Ciência Rural*, 47(9). Article number: e20151646. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20151646>.
- Gonçalves, G. C. V., Catharina Weis, C. M. S., Wolff Élida, R., Alves, V. et al. 2024. Vegan fermented drinks as an alternative to milk: Trend or challenge? *Food Science and Engineering*, 6(1). DOI: <https://ojs.wiserpub.com/index.php/FSE/article/view/5396>.
- Katina, K., Laitila, A., Juvonen, R., Liukkonen, K.-H. et al. 2007. Bran fermentation as a means to enhance technological properties and bioactivity of rye. *Food Microbiology*, 24(2), pp. 175–186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.07.012>.
- Suna, S., Incedayi, B., Tamer, C. E., Ozcan-Sinir, G. et al. 2019. Lemon verbena (*Lippia citriodora* Kunth) beverages: Physicochemical properties, contents of total phenolics and minerals, and bioaccessibility of antioxidants. *Italian Journal of Food Science*, 31(1), pp. 40–53.

Сведения об авторах

Поснова Галина Владимировна – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), канд. техн. наук, доцент;
e-mail: g.posnova@mgutm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9594-7632>

Galina V. Posnova – 73 Zemlyanoi Val Str., Moscow, Russia, 109004;
K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management
(The First Cossack University), Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: g.posnova@mgutm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9594-7632>

Иванова Наталья Геннадьевна – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), канд. техн. наук, доцент;
Стремянный пер., 36, г. Москва, Россия, 115054;
Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова;
e-mail: n.ivanova@mgutm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3878-6355>

Natalia G. Ivanova – 73 Zemlyanoi Val Str., Moscow, Russia, 109004;
K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management
(The First Cossack University), Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
36 Stremyanny Lane, Moscow, Russia, 115054;
Plekhanov Russian University of Economics;
e-mail: n.ivanova@mgutm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3878-6355>

Панчук Карина Алексеевна – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), студент;
e-mail: g.posnova@mgutm.ru

Karina A. Panchuk – 73 Zemlyanoi Val Str., Moscow, Russia, 109004;
K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management
(The First Cossack University), Student;
e-mail: g.posnova@mgutm.ru

УДК 581.134:676.031.33

Влияние географического происхождения и сезонности заготовки *Populus tremula* L. на содержание фенолов и их производных для создания функциональных пищевых систем

В. П. Сергун, М. М. Шамова, В. М. Позняковский, И. Ю. Сергеева*

*Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия;
e-mail: sergeeva.76@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1686-0131>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
03.02.2026;

получена
после доработки
01.06.2026;

принята
к публикации
24.06.2026

Ключевые слова:

Populus tremula,
осина, салицин,
полифенолы,
сезонность,
географическая
изменчивость,
функциональные
пищевые ингредиенты

Кора *Populus tremula* L. (осины) является перспективным источником биологически активных соединений (БАВ), в частности фенолгликозида салицина и комплекса полифенолов (фенолокислот, флавоноидов), обладающих выраженным антиоксидантным и противовоспалительным потенциалом. Цель исследования – оценка влияния географического ареала заготовки и сезонной динамики на содержание экстрактивных веществ, салицина и полифенольных соединений, антиоксидантной активности в коре осины для оптимизации ее использования в функциональных пищевых системах. Объектами исследований служили образцы коры осины, собранные в течение 2025 г. в разных географических местах произрастания: Алтайский край и Томская обл. Установлено, что фаза покоя является оптимальным временем для заготовки коры осины как сырья, обогащенного салицином. Образцы из Алтайского края характеризовались более низким содержанием салицина (в среднем до 40 %), общего пула экстрактивных веществ (в среднем до 30 %) и полифенолов по сравнению с образцами из Томской области как в фазе покоя, так и при вегетации (сокодвижении). Экстракт коры осины, полученный из Алтайского края, характеризовался относительно низкой АОА ($0,56 \pm 0,01$ моль/кг). Кинетика инициированного окисления модельного субстрата (кумола) в присутствии данного экстракта выявила низкую величину константы скорости окисления. Образцы коры осины, привезенные из Томской области, демонстрировали существенное изменение антиоксидантного профиля водного экстракта. Общее содержание антиоксидантных соединений возросло на 35 % ($0,76 \pm 0,01$ моль/кг), а хроматографический анализ выявил присутствие ингибиторов II типа. Полученные данные имеют важное прикладное значение для разработки стандартизированных экстрактов коры осины. Такие экстракты, с гарантированным и воспроизводимым содержанием салицина и полифенолов, могут быть использованы в качестве функциональных пищевых ингредиентов, что соответствует современным трендам персонализированного питания и нутрицевтики.

Для цитирования

Сергун В. П. и др. Влияние географического происхождения и сезонности заготовки *Populus tremula* L. на содержание фенолов и их производных для создания функциональных пищевых систем. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 433–441. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-433-441>.

The effect of edaphoclimatic conditions and seasonality of *Populus tremula* L. on the content of phenols and their derivatives for creating functional food systems

Valery P. Sergun, Maria M. Shamova, Valery M. Poznyakovsky, Irina Yu. Sergeeva*

*Kemerovo State University, Kemerovo, Russia;
e-mail: sergeeva.76@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1686-0131>

Article info

Received
03.02.2026;

received
in revised form
01.06.2026;

accepted
24.06.2026

Key words:

Populus tremula,
aspen, salicin,
polyphenols,
seasonality,
geographical
variability,
functional food
ingredients

Abstract

The bark of *Populus tremula* L. (aspen) is a promising source of biologically active compounds (BAC), in particular salicin phenylglycoside and a complex of polyphenols (phenolic acids, flavonoids) with pronounced antioxidant and anti-inflammatory potential. The aim of this study is to evaluate the influence of the geographical area of harvesting and seasonal dynamics on the content of extractive substances, salicin and polyphenolic compounds, and antioxidant activity in aspen bark to optimize its use in functional food systems. The objects of the study are aspen bark samples collected during 2025 in different geographical locations: Altai Krai and Tomsk Region. It has been found that the dormant phase is the optimal time for harvesting aspen bark as a raw material enriched in salicin. The samples from Altai Krai are characterized by lower salicin content (up to 40 % on average), total extractive pool (up to 30 % on average), and polyphenols compared to the samples from Tomsk Region, both in the dormant phase and during vegetation (sap flow). The aspen bark extract obtained from Altai Krai is characterized by a relatively low antioxidant activity (0.56 ± 0.01 mol/kg). The kinetics of initiated oxidation of the model substrate (cumene) in the presence of this extract has revealed a low oxidation rate constant. Aspen bark samples brought from Tomsk Region have demonstrated a significant change in the antioxidant profile of the aqueous extract. The total content of antioxidant compounds increases by 35 % (0.76 ± 0.01 mol/kg), and chromatographic analysis reveals the presence of type II inhibitors. The obtained data are of great practical importance for the development of standardized aspen bark extracts. Such extracts, with guaranteed and reproducible salicin and polyphenol content, can be used as functional food ingredients corresponding to modern trends in personalized nutrition and nutraceuticals.

For citation

Sergun, V. P. et al. 2026. The effect of edaphoclimatic conditions and seasonality of *Populus tremula* L. on the content of phenols and their derivatives for creating functional food systems. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 433–441. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-433-441>.

Введение

Растительные полифенолы, включая фенольные гликозиды и фенолокислоты, представляют значительный интерес для пищевой и фармацевтической промышленности благодаря широкому спектру биологической активности: антиоксидантной, противовоспалительной, антимикробной и пребиотической (Михайлова и др., 2022; Машковский, 2012; Pandey et al., 2009). Ученые исследуют влияние полифенолов, поступающих с пищей, на микробиоту кишечника для выявления биомаркеров и их влияния на здоровье (Espin et al., 2016).

Кора и листья деревьев рода *Populus*, в частности *Populus tremula* L. (осина, тополь дрожащий), традиционно используются в народной медицине и являются богатым источником этих соединений (Применение салицина..., 2025). Так, экстракт коры осины обладает противоязвенной активностью, что подтверждается результатами экспериментов *in vivo* (Крылова и др., 2000). Экстракты густые водные из листьев осины обыкновенной рекомендованы к использованию для оптимизации питания и коррекции витаминно-минерального статуса (Корчин и др., 2019).

Экстракты коры и листьев включают в состав биологически активных добавок к пище (Биологически активная..., 2017; Способ получения..., 2001), чайных напитков (Способ производства..., 2019). Чайные напитки реализуются в розничной торговле различными производственными компаниями: ООО Родные Травы (Адыгея); ООО Фарм групп (Алтайский край, г. Барнаул), ЛЕКРА-СЭТ (г. Барнаул, Алтайская торгово-промышленная палата) и др.

Наибольшую известность среди биологически активных веществ (БАВ) коры осины получил салицин – фенольный гликозид, являющийся природным предшественником салициловой кислоты (рис. 1).

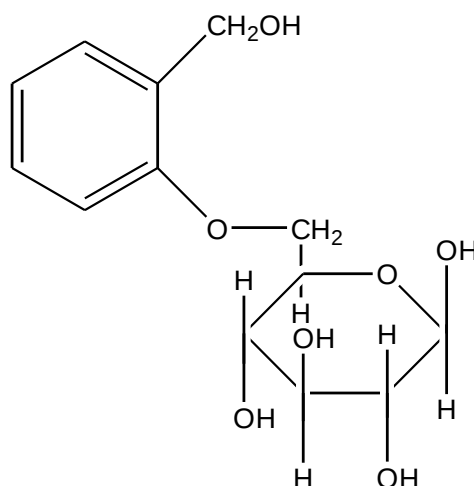


Рис. 1. Структурная формула салицина
Fig. 1. Structural formula of salicin

В отличие от синтетических аналогов, салицин проявляет селективную активность и не оказывает выраженного ulcerогенного действия на слизистую желудочно-кишечного тракта, что открывает перспективы его использования в гастропротективных функциональных продуктах (Конюхова и др., 2016). Природный салицин оказывает различное фармакологическое действие. Так, установлено остеопротекторное действие салицина в модели *in vivo* – салицин предотвращает вызванную TNF- α дегенерацию хрящевого матрикса, ингибирует пролиферацию хондроцитов и способствует их апоптозу (Guangping et al., 2022). Эфирное производное салицина является перспективным в лечении диабета (Zhu et al., 2022). В животной модели показана эффективность применения салицина при лечении пародонтита (Zhang et al., 2024). Исследования в модели пневмонии у мышей, инфицированных *S. aureus*, показали, что салицин может не только снизить содержание бактерий в легких мышей, но и продлить их жизнь. Салицин был идентифицирован как эффективное противомикробное соединение (Jiang et al., 2023), перспективное средство профилактики возрастных заболеваний сосудов (Guo et al., 2019).

Помимо салицина, в коре осины идентифицирован комплекс полифенолов, включающий производные коричной (п-кумаровая, кофейная, феруловая) и бензойной (салициловая, ванилиновая, галловая) кислот, а также флавоноиды, которые вносят существенный вклад в общий антиоксидантный потенциал сырья (Соболева и др., 2020), обладают стимулирующим действием на микробиоту кишечника, способствуют уменьшению воспаления, оказывают бактерицидный эффект (Guerra-Valle et al., 2022), проявляют антимикробные свойства (Chauhan et al., 2021) и демонстрируют иммуномодулирующую активность (Kilani-Jaziri et al., 2017).

Эффективность и безопасность применения растительного сырья в пищевых системах напрямую зависит от стандартизации его состава. Содержание вторичных метаболитов в растениях подвержено

значительной изменчивости под влиянием эдафо-климатических условий (почвенный фактор и географический ареал) и фенологической фазы развития (сезонность) (Соболева и др., 2020; Соболева и др., 2010).

Влияние этих факторов на биохимический потенциал коры *Populus tremula* L. изучено недостаточно, что затрудняет создание конкурентоспособных стандартизированных пищевых ингредиентов.

Целью исследования является комплексное изучение влияния географического происхождения и сезонности заготовки на биохимический потенциал коры *Populus tremula* L. при создании функциональных пищевых систем. Поставленная цель достигалась исследованием влияния географического происхождения и фенологической фазы развития на количественное содержание экстрактивных веществ, салицина, полифенольных веществ и антиоксидантной активности коры *Populus tremula* L. для научного обоснования выбора оптимального сырья, перспективного для переработки и применения в пищевой промышленности.

Материалы и методы

Объектами исследований служили образцы коры осины, собранные в течение 2025 г. в разных географических местах произрастания:

- Алтайский район, Алтайский край, Россия (село Алтайское – 51°56' с. ш., 85°19' в. д.);
- Томская область, Россия: село Корнилово (56°29'35" с. ш., 85°10'26" в. д.), село Мельниково (56°33' с. ш., 84°04' в. д.), село Бакчар (57°01' с. ш., 82°04' в. д.).

Количество образцов сырья каждого региона составляло не менее 5. Влажность коры $8,7 \pm 0,4$ %.

Содержание суммы водорастворимых экстрактивных веществ в сырье определялось с использованием предварительного кипячения с водой измельченного сырья (размер частиц $3,0 \pm 0,1$ мм) на водяной бане с обратным холодильником в течение 1,5 ч. Полученный экстракт предварительно упаривали на ротационном испарителе при температуре 60 °С до концентрации сухих веществ 65 %, затем досушивали в вакуумном сушильном шкафу при температуре 60 °С до постоянной массы и взвешивали. Содержание экстрактивных веществ представлено в процентах в пересчете на абсолютно-сухое сырье¹.

Определение содержания полифенолов проводили колориметрическим методом с применением реактива Folin-Ciocalteu и регистрации оптической плотности при длине волны 765 нм по ГОСТ Р ИСО 14502-1-2010².

Определение содержания салицина в коре осины осуществляли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе Shimadzu LC 2010 (20A) с использованием обращенно-фазовой колонки с предварительным переводом салицина из образца коры осины в раствор путем экстракции навески водой. При хроматографировании использовали подвижную фазу, состоящую из смеси ацетонитрила и муравьиной кислоты 2 % (5 : 95), pH смеси равное 3, такое значение получали, добавляя к готовому раствору натрия гидроксида раствор 1 моль/дм³. Скорость потока подвижной фазы – 0,5 мл/мин, объем пробы – 10 мкл, детектирование проводили при длине волны 268 нм. Время анализа составляло 15 мин. Регистрацию аналитического сигнала салицина проводили при градиентном элюировании с помощью ультрафиолетового детектора³. Содержание вещества в исследуемом сырье рассчитывали по площади пика на хроматограмме с учетом данных градуировочного графика с использованием стандартных растворов салицина (Sigma-Aldrich, чистота ≥ 99 %). Результаты выражали в процентах (г салицина на 100 г абсолютно сухого сырья).

Содержание антиоксидантов в экстрактах из сырья определяли кинетическим методом при помощи модельной реакции инициированного окисления кумола при 60 °С в присутствии инициатора (Варданян и др. 2025).

Статистическая обработка данных производилась с использованием программы Statistica 10.0. Достоверность различий между группами оценивали с помощью двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$ (достоверные различия между сезонами в пределах одного региона, достоверные различия между регионами в пределах одного сезона).

Результаты и обсуждение

Проведенные сравнительные исследования выявили два ключевых фактора, детерминирующих содержание ценных биологически активных соединений в коре *Populus tremula* L., – фенологическая фаза дерева и географическое происхождение сырья.

Результаты анализа демонстрируют четкую сезонную динамику накопления экстрактивных веществ и салицина в коре осины (рис. 2, 3), содержание которых, заготовленных в фазе покоя, достоверно ($p < 0,05$) превышало показатели вегетационных проб исследуемых регионов.

¹ Государственная фармакопея Российской Федерации. XV издание. 2023. URL: <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15/>.

² ГОСТ Р ИСО 14502-1-2010. Чай. Метод определения общего содержания полифенолов. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/50994/?ysclid=mqs2nbrgvpv946704365>.

³ МУ 08-47/172. Кора ивы и осины, экстракты из них и БАД на их основе. ВЭЖХ метод определения массовой концентрации салицина. Введ. 2005. Томск : Томск. политех. ун-т, 2005. 17 с.

Это согласуется с общебиологическими закономерностями, согласно которым в период покоя происходит перераспределение и накопление запасных и защитных метаболитов в перидерме растений (Бозорова и др., 2022). Таким образом, с биохимической точки зрения именно фаза покоя является оптимальным временем для заготовки коры осины как сырья, обогащенного салицином.

Установлены статистически значимые различия в химическом составе коры между регионами (рис. 2, 3).

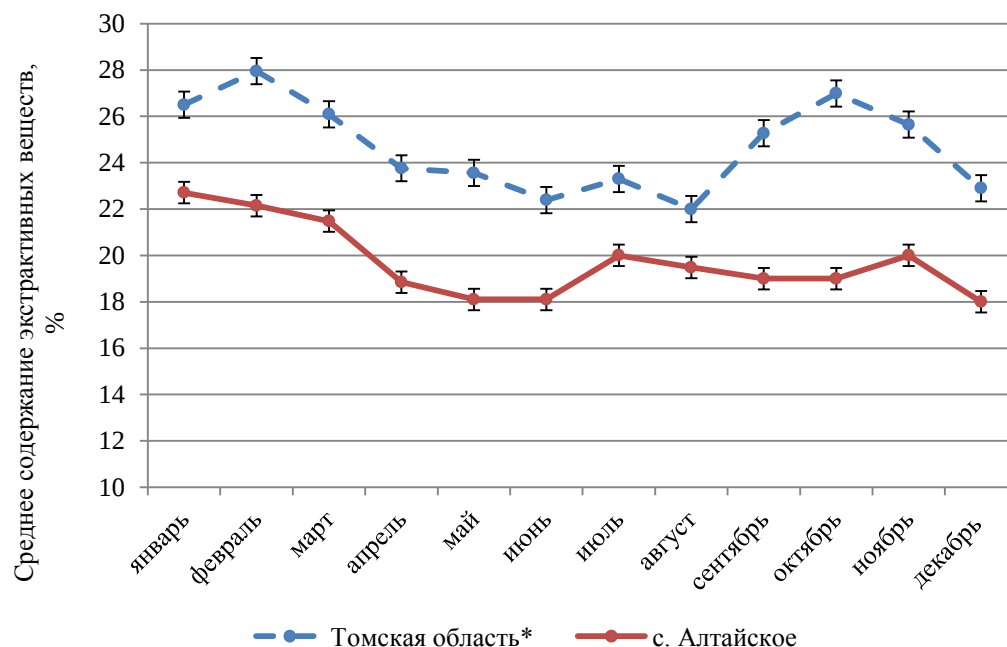


Рис. 2. Влияние сезонности и места произрастания на накопление экстрактивных веществ в коре *Populus tremula* L. (*Томская область – усредненные данные по трем регионам сбора)
Fig. 2. The influence of seasonality and place of growth on the accumulation of extractive substances in the bark of *Populus tremula* L. (*Tomsk region – average data for three collection regions)

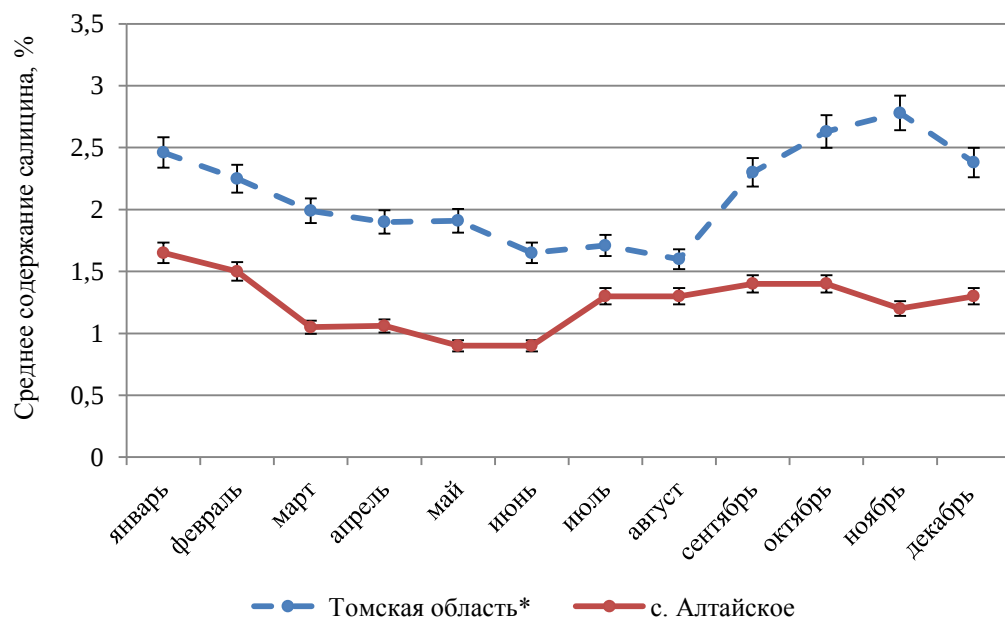


Рис. 3. Влияние сезонности и места произрастания на накопление салицина в коре *Populus tremula* L. (*Томская область – усредненные данные по трем регионам сбора)
Fig. 3. The influence of seasonality and place of growth on the accumulation of salicin in the bark of *Populus tremula* L. (*Tomsk region – average data for three collection regions)

Полученные данные демонстрируют выраженную сезонную динамику накопления экстрактивных веществ и салицина: высокие значения в зимние месяцы (покой), падение весной (начало вегетации), относительный минимум летом и вторичный подъем осенью. Однако экспериментальные кривые по исследуемым показателям, относящиеся к Томской области, расположены значительно выше кривых с. Алтайского на протяжении всего года.

Так, кривая накопления экстрактивных веществ (рис. 2) для Томской области стабильно доминирует над кривой с. Алтайское в течение всего года. В фазе покоя (ноябрь – февраль) разрыв достигает 5–6 %, что в относительном выражении соответствует 25–30 %. Интересно отметить, что летний минимум экстрактивных веществ в Томской области ($22,0 \pm 0,4$ %) практически равен зимнему пику в с. Алтайское ($22,71 \pm 0,4$ %).

Сезонная динамика содержания салицина (рис. 3) демонстрирует принципиальное различие в характере кривых для двух регионов. Для Томской области характерна ярко выраженная двухвершинная кривая с мощным осенним пиком (ноябрь, $2,80 \pm 0,05$ %) и зимним плато. В с. Алтайское сезонные колебания салицина сглажены, а максимальные зимние значения ($1,70 \pm 0,03$ %) лишь незначительно превышают летний минимум ($0,95 \pm 0,02$ %). Ключевым результатом является то, что летний минимум содержания салицина в образцах из Томской области ($1,60 \pm 0,03$ %, август) статистически не отличается от зимнего максимума образцов из Алтайского края ($1,65 \pm 0,03$ %, январь). Это означает, что даже в неблагоприятный для синтеза салицина период вегетации кора осины Томской области содержит данный гликозид в количестве, сопоставимом с максимально возможным уровнем для алтайской популяции. Кроме того, осенний подъем салицина в коре осины Томской области (+75 % относительно августовского минимума) существенно превышает аналогичный показатель для с. Алтайское (+15 %).

Данные различия, вероятно, обусловлены комплексом факторов: почвенными условиями, уровнем инсоляции, температурным режимом и влагообеспеченностью, которые модулируют работу фенилпропаноидного пути биосинтеза (Поливанова и др., 2023). Можно предположить, что континентальные и, следовательно, стрессовые условия Томской области (более резкие перепады температур, возможно, иной режим увлажнения и инсоляции) выступают в роли естественного фактора-индуктора, стимулирующего у растений усиленный синтез защитных вторичных метаболитов, к которым относится и салицин. Данное наблюдение подчеркивает важность не только фенологического, но и географического аспекта стандартизации лекарственного растительного сырья, поскольку местообитание существенно влияет на его качественный и количественный состав.

Полученные закономерности накопления экстрактивных веществ и салицина отражаются и в содержании полифенолов коры осины (рис. 4). Для исследований были взяты образцы коры *Populus tremula* L.: в периоде покоя до сокодвижения – март, апрель; в период вегетации – май; в периоде покоя после сокодвижения – сентябрь, октябрь.

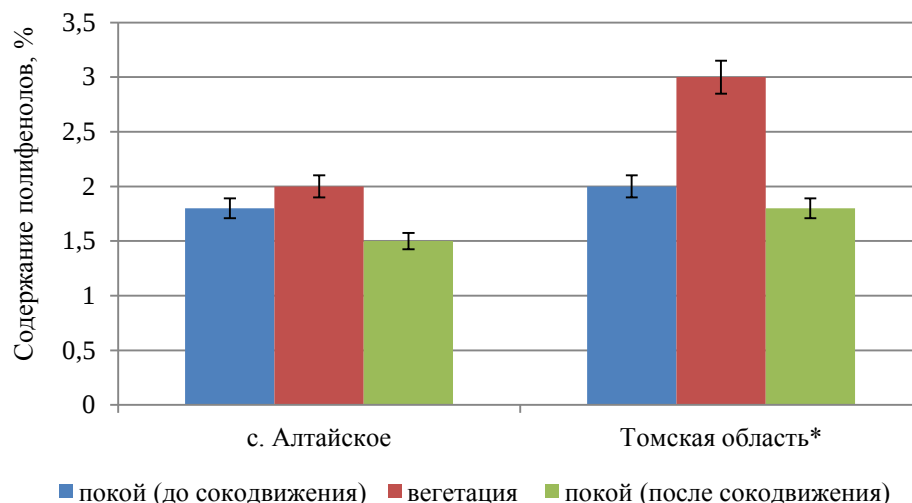


Рис. 4. Влияние сезонности и места произрастания на накопление полифенолов в коре *Populus tremula* L. (*Томская область – усредненные данные по трем регионам сбора)
Fig. 4. The influence of seasonality and place of growth on the accumulation of polyphenols in the bark of *Populus tremula* L. (*Tomsk region – average data for three collection regions)

Содержание в коре осины полифенолов объясняет антиоксидантные свойства растения. Исследовали антиоксидантную активность (АОА) водных экстрактов коры осины в период покоя после вегетации (октябрь – декабрь). Результаты представлены в таблице.

Таблица. Антиоксидантная активность образцов коры осины разных регионов произрастания
Table. Antioxidant activity of aspen bark samples from different growing regions

Регион	АОА _{общ} , моль/кг	$^1K_7 \times 10^4$, л/(моль·с)	$^2K_7 \times 10^3$, л/(моль·с)
с. Алтайское	$0,56 \pm 0,01$	–	$3,10 \pm 0,06$
Томская обл.*	$0,76 \pm 0,01$	$0,300 \pm 0,006$	$5,10 \pm 0,10$

Примечание. *Томская область – усредненные данные по трем регионам сбора; $^1K_7 \times 10^4$ л/(моль·с) – константа скорости ингибирования для ингибиторов I типа (соединения, обрывающие цепи окисления по механизму передачи атома водорода, например, простые фенолы); $^2K_7 \times 10^3$ л/(моль·с) – наблюдаемая константа скорости окисления модельного субстрата (кумола) в присутствии экстракта (фактически эффективная константа, отражающая общую антиоксидантную способность).

Полученные кинетические параметры свидетельствуют о принципиально различном антиоксидантном профиле экстрактов коры осины. Образцы из Томской области не только превосходят образцы из с. Алтайское по общей антиоксидантной активности (на 35 %), но и характеризуются более сложным механизмом действия: наряду с ингибиторами I типа ($K_7 = 0,300 \times 10^4$ л/(моль·с)) в них присутствуют соединения II типа (например, флавоноиды и конденсированные танины), что приводит к существенно более высокой наблюдаемой константе скорости ингибирования ($5,10 \times 10^3$ против $3,10 \times 10^3$ л/(моль·с) для с. Алтайское). Отсутствие ингибиторов I типа в образцах с. Алтайское при измеримой общей активности указывает на доминирование соединений с низкой радикал-связывающей способностью, что согласуется с более низким содержанием салицина и полифенолов в данном сырье.

Заключение

На формирование ресурсного потенциала коры осины как источника салицина оказывают сопряженное влияние хронологический (сезонный) и географический факторы. Максимальное накопление целевых метаболитов наблюдается в фазу покоя у растений, произрастающих в регионах с более стрессовыми климатическими условиями (на примере Томской области). Эти выводы имеют практическое значение для разработки научно обоснованных рекомендаций по рациональной заготовке сырья с прогнозируемо высоким содержанием биологически активных соединений.

В ходе исследований установлено, что более перспективным сырьем для получения функциональных пищевых ингредиентов являются образцы осины, произрастающей в Томской области. При этом сбор лучше производить в период покоя после вегетации (сентябрь – декабрь). В коре осины в этих условиях накапливается существенное содержание салицина (от $2,38 \pm 0,04$ до $2,78 \pm 0,05$ %), полифенольных веществ ($1,8 \pm 0,04$ %). Более высокое общее содержание фенольных соединений в образцах осины (АОА), произрастающей в Томской области, сопровождается появлением дополнительных классов антиоксидантов (более высокой наблюдаемой константе скорости ингибирования ($5,10 \times 10^3$ против $3,10 \times 10^3$ л/(моль·с) для с. Алтайское), а также отсутствие ингибиторов I типа в образцах с. Алтайское, напрямую определяет их превосходящий антирадикальный потенциал. Данные результаты убедительно доказывают, что антиоксидантная активность коры осины является интегральным показателем, зависящим от комплекса эколого-фенологических факторов, и что сырье из Томской области, заготовленное в осенне-зимний период, является более предпочтительным источником не только салицина, но и эффективных полифенольных антиоксидантов.

Полученные данные имеют важное прикладное значение для разработки стандартизированных экстрактов коры осины. Такие экстракты, с гарантированным и воспроизводимым содержанием салицина и полифенолов, могут рассматриваться как перспективные компоненты для дальнейших исследований в области создания функциональных пищевых систем.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Биологически активная добавка к пище, обладающая антипаразитарной активностью : пат. 2621256 Рос. Федерация / Е. И. Верещагин. № 2016136275 ; заявл. 08.09.2016 ; опубл. 01.06.2017, Бюл. № 16. EDN: KJLQQ.
- Бозорова Б. Ш., Зупарова С. Ш. Анализ и методология периода покоя растений // Academic Research in Educational Sciences. 2022. № 1. С. 1019–1027. DOI: <https://doi.org/10.24412/2181-1385-2022-1-1019-1027>.
- Варданян Л. Р., Арутюнян С. А., Торосян Г. О. Исследование антиоксидантной активности растительного сырья как натурального стабилизатора пищевых продуктов // Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55, № 3. С. 485–495. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2586>. EDN: LRQUNI.

- Конюхова О. М., Бахтин М. А., Канарский А. В. Биологические ресурсы салицина в иве (*Salicaceae*) // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19, № 16. С. 130–132. EDN: WMUHTJ.
- Корчин В. И., Корчина Т. Я., Нехорошева А. В., Леонов В. В. [и др.]. Листья осины как перспективный источник нутриентных элементов // Современные проблемы науки и образования. 2019. № 2. С. 98. DOI: <https://doi.org/10.17513/spno.28608>. EDN: ZEZXFX.
- Крылова С. Г., Зуева Е. П., Разина Т. Г., Амосова Е. Н. [и др.]. Влияние сухого экстракта коры осины на секреторную функцию желудка // Экспериментальная и клиническая фармакология. 2000. Т. 63, № 5. С. 31–33. EDN: KBTRFR.
- Машковский М. Д. Лекарственные средства. М. : Новая волна, 2012. 1216 с.
- Михайлова Е. А., Огурцов Е. А. Применение экстрактов коры осины (*Populus tremula* L.) в качестве перспективного средства для комплексной терапии и профилактики ряда нозологий. Метаанализ данных современной научной литературы // Современная медицина: новые подходы и актуальные исследования : сб. ст. по материалам LXIV-LXV междунар. науч.-практ. конф., Москва, 25 октября 2022 г. М. : Интернаука, 2022. Т. 9-10(59). С. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.32743/25419854.2022.9-10.59.346242>. EDN: XHNGC.
- Поливанова О. Б., Чередниченко М. Ю. Регуляция и метаболическая инженерия центрального фенилпропаноидного метаболического пути в ответ на воздействие стрессовых факторов у растений // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2023. Т. 26, № 5. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.29296/25877313-2023-05-01>. EDN: LKLGTE.
- Применение салицина, обладающего нейротропной активностью : пат. № 2832938 Рос. Федерация / Е. Н. Зайцева, В. А. Куркин, И. И. Мунина, А. В. Куркина [и др.]. № 2023136475 ; заявл. 31.12.2023 ; опубл. 10.01.2025/ Бюл. № 1. EDN: CQLDRA.
- Соболева С. В., Воронин В. М., Есякова О. А. Содержание биологически активных веществ водно-этанольных экстрактов из коры осины и изучение их рострегулирующей активности // Химия растительного сырья. 2020. № 1. С. 373–380. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020014442>. EDN: KWTFRT.
- Соболева С. В., Ченцова Л. И. Изучение сезонной динамики накопления экстрактивных веществ коры тополя и получение на их основе экстрактов // Вестник КрасГАУ. 2010. № 5(44). С. 154–158. EDN: MSNPKB.
- Способ получения средства, обладающего противоописторхозным действием : пат. № 2162701 Рос. Федерация / В. Н. Буркова, С. Г. Боев, Т. К. Мозжелина, В. Н. Чекрыгин. № 2000106366/14 ; заявл. 14.03.2000 ; опубл. 10.02.2001. Бюл. № 4. EDN: DGYVKP.
- Способ производства чая из листьев осины обыкновенной : пат. 2679191 Рос. Федерация / А. В. Нехорошева, С. В. Нехорошев, Э. Х. Ботиров, Д. С. Нехорошева [и др.]. № 2017137218 ; заявл. 23.10.2017 ; опубл. 06.02.2019/ Бюл. № 4.
- Chauhan R., Azmi W., Bansal S., Goel G. Multivariate analysis of adaptive response to ferulic acid and p-coumaric acid after physiological stresses in *Cronobacter sakazakii* // Journal of Applied Microbiology. 2021. Vol. 131, Iss. 6. P. 3069–3080. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.15164>.
- Espín J., Selma M., Tomás-Barberán F. Interactions of gut microbiota with dietary polyphenols and consequences to human health // Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care. 2016. Vol. 19, Iss. 6. P. 471–476. DOI: <https://doi.org/10.1097/MCO.0000000000000314>.
- Guangping Z., Junxia Z., Ling Y., Guangda X. Preventive effect of salicin ether against type-2 diabetes mellitus through targeting PPAR γ -regulated gene expression // Acta Biochimica Polonica. 2022. Vol. 69, N 3. P. 619–623. DOI: https://doi.org/10.18388/abp.2020_5983.
- Guerra-Valle M., Orellana-Palma P., Petzold G. Plant-based polyphenols: Anti-*helicobacter pylori* effect and improvement of gut microbiota // Antioxidants. 2022. Vol. 11, Iss. 1. Article number: 109. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11010109>.
- Guo F., Wu R., Xu J. Salicin prevents TNF- α -induced cellular senescence in human umbilical vein endothelial cells (HUVECs) // Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology. 2019. Vol. 47, Iss. 1. P. 2618–2623. DOI: <https://doi.org/10.1080/21691401.2019.1629949>.
- Jiang Y., Hou J., Liu C., Zhao C. [et al.]. Inhibitory effect of salicin on *Staphylococcus aureus* coagulase // ChemMedChem. 2023. Vol. 18, Iss. 22. Article number: e202300302. DOI: <https://doi.org/10.1002/cmdc.202300302>.
- Kilani-Jaziri S., Mokdad-Bzeouich I., Krifa M., Nasr N. [et al.]. Immunomodulatory and cellular anti-oxidant activities of caffeic, ferulic, and p-coumaric phenolic acids: A structure – activity relationship study // Drug and Chemical Toxicology. 2017. Vol. 40, Iss. 4. P. 416–424. DOI: <https://doi.org/10.1080/01480545.2016.1252919>.
- Pandey K. B., Rizvi S. I. Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease // Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2009. Vol. 2. Article number: 897484. DOI: <https://doi.org/10.4161/oxim.2.5.9498>.
- Zhang Z., Zhou Z., Liu J., Zheng L. [et al.]. Salicin alleviates periodontitis via Tas2r143/gustducin signaling in fibroblasts // Frontiers in Immunology. 2024. Vol. 15. Article number: 1374900. DOI: <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1374900>.

Zhu Z., Gao S., Chen C., Wei X. [et al.]. The natural product salicin alleviates osteoarthritis progression by binding to IRE1 α and inhibiting endoplasmic reticulum stress through the IRE1 α -I κ B α -p65 signaling pathway // *Experimental & Molecular Medicine*. 2022. Vol. 54. P. 1927–1939. DOI: <https://doi.org/10.1038/s12276-022-00879-w>.

References

- Vereshchagin, E. I. 2017. Biologically active food additive with antiparasitic activity, Russian Federation, Pat. 2621256. (In Russ.)
- Bozorova, B. Sh., Zuparova, S. Sh. 2022. Analysis and methodology of the dormant period in plants. *Academic Research in Educational Sciences*, 1, pp. 1019–1027. DOI: <https://doi.org/10.24412/2181-1385-2022-1-1019-1027>. (In Russ.)
- Vardanyan, L. R., Arutyunyan, S. A., Torosyan, G. O. 2025. Study of the antioxidant activity of plant materials as a natural stabilizer of food products. *Food Processing: Techniques and Technology*, 55(3), pp. 485–495. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2586>. EDN: LRQUNI. (In Russ.)
- Konyukhova, O. M., Bakhtin, M. A., Kanarsky, A. V. 2016. Biological resources of salicin in willow (Salicaceae). *Herald of Technological University*, 19(16), pp. 130–132. EDN: WMUHTJ. (In Russ.)
- Korchin, V. I., Korchina, T. Ya., Nekhorosheva, A. V., Leonov, V. V. et al. 2019. Aspen leaves as a promising source of nutrient elements. *Modern Problems of Science and Education*, 2, pp. 98. DOI: <https://doi.org/10.17513/spno.28608>. EDN: ZEZXFX. (In Russ.)
- Krylova, S. G., Zueva, E. P., Razina, T. G., Amosova, E. N. et al. 2000. The effect of dry aspen bark extract on the secretory function of the stomach. *Experimental and Clinical Pharmacology*, 63(5), pp. 31–33. EDN: KBTRFR. (In Russ.)
- Mashkovsky, M. D. 2012. Medicines. Moscow. (In Russ.)
- Mikhailova, E. A., Ogurtsov, E. A. 2022. The use of aspen bark extracts (*Populus tremula* L.) as a promising agent for the complex therapy and prevention of a number of nosologies. Meta-analysis of modern scientific literature data. *Modern Medicine: New Approaches and Current Research*, 9–10, pp. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.32743/25419854.2022.9-10.59.346242>. EDN: XHIHGC. (In Russ.)
- Polivanova, O. B., Cherednichenko, M. Yu. 2023. Regulation and metabolic engineering of the central phenylpropanoid metabolic pathway in response to stress factors in plants. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 26(5), pp. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.29296/25877313-2023-05-01>. EDN: LKLGTE. (In Russ.)
- Zaitseva, E. N., Kurkin, V. A., Munina, I. I., Kurkina, A. V. et al. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Medical University". 2025. Use of salicin having neurotropic activity, Russian Federation, Pat. 2832938. EDN: CQLDRA. (In Russ.)
- Soboleva, S. V., Voronin, V. M., Esyakova, O. A. 2020. The content of biologically active substances in water-ethanol extracts from aspen bark and a study of their growth-regulating activity. *Chemistry of Plant Raw Material*, 1, pp. 373–380. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020014442>. EDN: KWTFRT. (In Russ.)
- Soboleva, S. V., Chentsova, L. I. 2010. A study of the seasonal dynamics of the accumulation of extractive substances from poplar bark and the obtaining of extracts based on them. *Bulletin of KSAU*, 5(44), pp. 154–158. EDN: MSNPKB. (In Russ.)
- Burkova, V. N., Boev, S. G., Mozzhelina, T. K., Chekrygin, V. N. LLC "Biolit". 2001. Method of obtaining a remedy with antihistronic effect, Russian Federation, Pat. 2162701. EDN: DGYVKP. (In Russ.)
- Nekhorosheva, A. V., Nekhoroshev, S. V., Botirov, E. H., Nekhorosheva, D. S. et al. Budgetary Institution of Higher Education of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra Khanty-Mansiysk State Medical Academy (KHMGM). 2017. Method of producing tea from aspen leaves, Russian Federation, Pat. 2679191. (In Russ.)
- Chauhan, R., Azmi, W., Bansal, S., Goel, G. 2021. Multivariate analysis of adaptive response to ferulic acid and p-coumaric acid after physiological stresses in *Cronobacter sakazakii*. *Journal of Applied Microbiology*, 131(6), pp. 3069–3080. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.15164>.
- Espín, J., Selma, M., Tomás-Barberán, F. 2016. Interactions of gut microbiota with dietary polyphenols and consequences to human health. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 19(6), pp. 471–476. DOI: <https://doi.org/10.1097/MCO.0000000000000314>.
- Guangping, Z., Junxia, Z., Ling, Y., Guangda, X. 2022. Preventive effect of salicin ether against type-2 diabetes mellitus through targeting PPAR γ -regulated gene expression. *Acta Biochimica Polonica*, 69(3), pp. 619–623. DOI: https://doi.org/10.18388/abp.2020_5983.
- Guerra-Valle, M., Orellana-Palma, P., Petzold, G. 2022. Plant-based polyphenols: Anti-*helicobacter pylori* effect and improvement of gut microbiota. *Antioxidants*, 11(1). Article number: 109. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11010109>.

- Guo, F., Wu, R., Xu, J. 2019. Salicin prevents TNF- α -induced cellular senescence in human umbilical vein endothelial cells (HUVECs). *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 47(1), pp. 2618–2623. DOI: <https://doi.org/10.1080/21691401.2019.1629949>.
- Jiang, Y., Hou, J., Liu, C., Zhao, C. et al. 2023. Inhibitory effect of salicin on *Staphylococcus aureus* coagulase. *ChemMedChem*, 18(22). Article number: e202300302. DOI: <https://doi.org/10.1002/cmdc.202300302>.
- Kilani-Jaziri, S., Mokdad-Bzeouich, I., Krifa, M., Nasr, N. et al. 2017. Immunomodulatory and cellular antioxidant activities of caffeic, ferulic, and *p*-coumaric phenolic acids: A structure – activity relationship study. *Drug and Chemical Toxicology*, 40(4), pp. 416–424. DOI: <https://doi.org/10.1080/01480545.2016.1252919>.
- Pandey, K. B., Rizvi, S. I. 2009. Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2. Article number: 897484. DOI: <https://doi.org/10.4161/oxim.2.5.9498>.
- Zhang, Z., Zhou, Z., Liu, J., Zheng, L. et al. 2024. Salicin alleviates periodontitis via Tas2r143/gustducin signaling in fibroblasts. *Frontiers in Immunology*, 15. Article number: 1374900. DOI: <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1374900>.
- Zhu, Z., Gao, S., Chen, C., Wei, X. et al. 2022. The natural product salicin alleviates osteoarthritis progression by binding to IRE1 α and inhibiting endoplasmic reticulum stress through the IRE1 α -I κ B α -p65 signaling pathway. *Experimental & Molecular Medicine*, 54, pp. 1927–1939. DOI: <https://doi.org/10.1038/s12276-022-00879-w>.

Сведения об авторах

Сергун Валерий Петрович – ул. Красная, 6, г. Кемерово, Россия, 650000;
Кемеровский государственный университет, канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: sergun_vp@biolit.info, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6368-9992>

Valery P. Sergun – 6 Krasnaya Str., Kemerovo, Russia, 650000;
Kemerovo State University, Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher;
e-mail: sergun_vp@biolit.info, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6368-9992>

Шамова Мария Михайловна – пр. Ленина, 36, г. Томск, Россия, 634050;
Национальный исследовательский Томский государственный университет, д-р техн. наук, доцент;
пр. Академический, 4/3, г. Томск, Россия, 634055;
Общество с ограниченной ответственностью "БИОЛИТ", заместитель директора;
e-mail: shamova_1976@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7257-8838>

Maria M. Shamova – 36 Lenina Ave., Tomsk, Russia, 634050;
Tomsk State University, Dr Sci. (Engineering), Associate Professor;
4/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk, Russia, 634055;
Limited Liability Company "BIOLIT", Deputy Director;
e-mail: shamova_1976@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7257-8838>

Позняковский Валерий Михайлович – ул. Ворошилова, 22а, г. Кемерово, Россия, 650056;
Кемеровский государственный медицинский университет, д-р биол. наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ;
e-mail: pvm1947@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7034-4675>

Valery M. Poznyakovsky – 22a Voroshilova Str., Kemerovo, Russia, 650056;
Kemerovo State Medical University, Dr Sci. (Biology), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation;
e-mail: pvm1947@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7034-4675>

Сергеева Ирина Юрьевна – ул. Красная, 6, г. Кемерово, Россия, 650000;
Кемеровский государственный университет, д-р техн. наук;
e-mail: sergeeva.76@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1686-0131>

Irina Yu. Sergeeva – 6 Krasnaya Str., Kemerovo, Russia, 650000;
Kemerovo State University, Dr Sci. (Engineering);
e-mail: sergeeva.76@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1686-0131>

УДК 597.562-152.6 (470.21)

Распространение половозрелых налимов (*Lotta lotta* L.) в Верхнетуломском водохранилище (Мурманская область) в посленерестовый период

С. И. Долотов*, А. Г. Потуткин

*Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства
и океанографии ("ПИНРО" им. Н. М. Книповича), г. Мурманск, Россия;

e-mail: dolotov@pinro.vniro.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8541-2068>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
26.05.2026;

принята
к публикации
25.06.2026

Ключевые слова:

Верхнетуломское
водохранилище,
налим, возраст,
пол, численность,
распространение,
глубина, температура,
сатурация

При обследовании одного из заливов Верхнетуломского водохранилища в марте – апреле 2023 г. выявлен ряд особенностей распространения половозрелых налимов в посленерестовый период. Установлено, что рыбы в возрасте от 6+ до 11+ обитали исключительно в прибрежной полосе шириной 400 м, максимальная глубина которой составляла 11,8 м. В пределах этой зоны минимум их численности отмечался на глубинах до 10,8 м, максимум – между отметками глубины 11,2 и 11,8 м. При этом налимы в возрасте 6+ и 7+ встречались по всему диапазону глубин, а достигшие возраста 8, 9, 10 и более полных лет – на глубинах не менее 9,2, 10,8 и 11,2 м соответственно. Доля самок поступательно увеличивалась с 25 % на глубинах до 9,2 м до 70 % на глубинах 11,2–11,8 м. Наиболее вероятной причиной обитания половозрелых налимов исключительно в прибрежной полосе водохранилища являлось расположение на глубине более 11,8 м слоя воды с низким содержанием кислорода. Выраженная неравномерность распределения численности налима внутри этой зоны была связана со спецификой распространения его особей разного возраста. Этим же фактором, в сочетании с характерным для налима данного водоема преобладанием самок в старших возрастных группах, обусловлены различия в распределении рыб разного пола. В свою очередь, неравномерность распределения налимов разных возрастных групп предположительно связана с различиями их температурного предпочтения, проявляющимися в росте уровня предпочитаемой температуры, происходящим по мере увеличения возраста. Ввиду недостатка данных проверка этой гипотезы требует проведения дополнительных исследований. Практический аспект представленных результатов состоит в их использовании для определения районов лова и оценки промыслового и нерестового запасов налима.

Для цитирования

Долотов С. И. и др. Распространение половозрелых налимов (*Lotta lotta* L.) в Верхнетуломском водохранилище (Мурманская область) в посленерестовый период. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 442–451. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-442-451>.

Distribution of mature burbot (*Lotta lotta* L.) in the Verkhnetulomsky reservoir (Murmansk region) in the post-spawning period

Sergei I. Dolotov*, Aleksandr G. Potutkin

*Polar Branch of All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography
("PINRO" named after N. M. Knipovich), Murmansk, Russia;

e-mail: dolotov@pinro.vniro.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8541-2068>

Article info

Received
26.05.2026;

accepted
25.06.2026

Key words:

Verkhnetulomskoye
reservoir, burbot,
age, sex, abundance,
distribution, depth,
temperature,
saturation

Abstract

In March – April 2023, the burbot distribution was studied in one of the bays of the Verkhnetulomsky reservoir. It was found that mature fish aged 6+ to 11+ lived exclusively in a coastal strip 400 m wide, with a maximum depth of 11.8 m. Within this zone, the minimum abundance of fish was observed at depths up to 10.8 m, the maximum – between depths of 11.2 and 11.8 m. Burbot aged 6+ and 7+ were found along over the entire depth range, and those who have reached the age of 8, 9, 10 or more years – at depths of at least 9.2, 10.8 and 11.2 m, respectively. The proportion of females increased steadily from 25 % at depths up to 9.2 m to 70 % at depths of 11.2–11.8 m. The most likely reason for burbot habitat exclusively in the coastal strip of the reservoir was the location of a layer of water with low oxygen content at a depth of more than 11.8 m. The pronounced uneven distribution of burbot abundance within this zone was associated with the distribution of burbot individuals of different ages. The same factor, combined with the predominance of females in the older age groups, caused differences in the distribution of fish of different sexes. In turn, the uneven distribution of burbot of different ages was presumably related to differences in their temperature preferences, which are manifested in an increase in preferred temperature, which occurs as the age of the fish increases. Due to the lack of data, the verification of this hypothesis requires additional research. The practical aspect of the presented results is their use to refine estimates of commercial and spawning burbot stocks.

For citation

Dolotov, S. I. et al. 2026. Distribution of mature burbot (*Lotta lotta* L.) in the Verkhnetulomsky reservoir (Murmansk region) in the post-spawning period. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 442–451. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-442-451>.

Введение

Налим относится к наиболее распространенным в пресных водоемах северного полушария видам рыб. Является популярным объектом любительского лова и во многих регионах имеет существенное значение для местного промысла (Сорокин, 1976; Неличик, 1985; Биоресурсы..., 2008; Богданов и др., 2009; Рыбы..., 2015; Харламов и др., 2019; Георгиев и др., 2022; Stapanian et al., 2008; 2010 и мн. др.). Изменения климата в сочетании с интенсивным рыболовством и техногенным воздействием на водоемы привели к сокращению области обитания и численности многих популяций рыб этого вида (Георгиев и др., 2022; Bernard et al., 1993; Martin et al., 2008; Stapanian et al., 2010; Toivonen et al., 2020). В этой связи возрос интерес к исследованиям различных аспектов их биологии, в том числе к изучению закономерностей распространения по акватории озера и водохранилищ, которые во многих частях ареала являются основными местами обитания налима.

Распространение налимов по акватории водоемов имеет четко выраженный сезонный характер. К настоящему времени оно наиболее полно описано для преднерестового и нерестового периодов (Сорокин, 1976; Неличик, 1985; Рыбы..., 2015; Георгиев и др., 2022; Edsall et al., 1993; Bergersen et al., 1993; Heather, 2016 и мн. др.), и в гораздо меньшей степени – для остальных периодов жизни налима (Рыбы..., 2015; Криксунов и др., 2020; Попова и др., 2020; Edsall et al., 1993; Carl, 1995; Harrison et al., 2013; Cott et al., 2015; Heather, 2016). Остаются слабо изученными аспекты количественного распределения рыб по участкам акватории. Немногочисленные данные по этому вопросу получены преимущественно для периода открытой воды (Рыбы..., 2015; Криксунов и др., 2020; Попова и др., 2020; Edsall et al., 1993; Carl, 1995; Harrison, 2015; Cott et al., 2015; Heather, 2016). Еще меньший объем информации собран о распределении взрослых особей разного возраста или длины (Попова и др., 2020; Harrison, 2015; Harrison et al., 2016). Сведения о сезонных особенностях распространения самцов и самок вне времени нерестовых миграций и нереста практически отсутствуют. Таким образом, сезонные и биологические закономерности распространения налимов по акватории озер и водохранилищ до сих пор изучены недостаточно.

Цель работы – исследовать распределение половозрелых особей налима на локальном участке акватории Верхнетуломского водохранилища в посленерестовый период, соответствующий концу сезона гидрологической зимы.

Материалы и методы

Работы проводились в марте – апреле 2023 г. на акватории одного из заливов центральной части северного побережья Верхнетуломского водохранилища (рис. 1).



Рис. 1. Схема Верхнетуломского водохранилища.
Круглым контуром обозначен район проведения работ, прямоугольным – участок облова

Fig. 1. Map of the Verkhnetulomsky reservoir.

A round contour indicates the area of work, a rectangular one indicates the fishing area

Во время исследований ледовая и температурная обстановка соответствовала концу периода гидрологической зимы, которая продолжается на водохранилищах северной части Мурманской области до первой-второй декады мая.

Для отлова рыб использовались донные удочки (самоловы), каждая из которых была оснащена одним крупным крючком с наживкой из свежей рыбы. Использование снастей, недоступных для заглатывания мелкими особями, исключало поимку рыб младших возрастных групп. Самоловы выставлялись полосой от берега к центру залива на протяжении 500 м от берега (рис. 1). Лунки с удочками маркировались табличками с номерами. В каждой из них с помощью рулетки промерялась глубина. У всех лунок определялись географические координаты, на основании которых с применением компьютерной программы Google Earth Pro определялось расстояние до берега. Самоловы проверялись утром и вечером. Улов раскладывался по пакетам с номерами, соответствующими номерам лунок.

Всего было поймано и исследовано 36 экз. налима. У них определялся пол, проводилась визуальная оценка состава содержимого и наполненности желудков. Для определения возраста отбирались отолиды, использование которых считается наиболее точным способом определения возраста рыб этого вида (Klein et al., 2014). Отолиды по всей поверхности выпуклой стороны, за исключением прилегающей непосредственно к краям, стачивались на половину толщины. Далее они промывались и замачивались в воде на 2 ч, после чего исследовались под бинокуляром. Зоны роста просчитывались от центра отолида к его периферии по максимальному радиусу. За годовую зону принималась комбинация двух последовательно расположенных темного и светлого колец.

Результаты

Батиметрическая характеристика акватории. До 100 м от берега дно обследованного района водохранилища быстро понижалось до глубины 9,2 м. На участке 100–200 м она постепенно увеличивалась до 10,8 м. В пределах участков 200–300 и 300–400 м глубина варьировала в границах 10,8–11,2 и 11,2–11,8 м соответственно. На участке 400–500 м дно понижалось с 11,8 до 12,7 м (рис. 2).

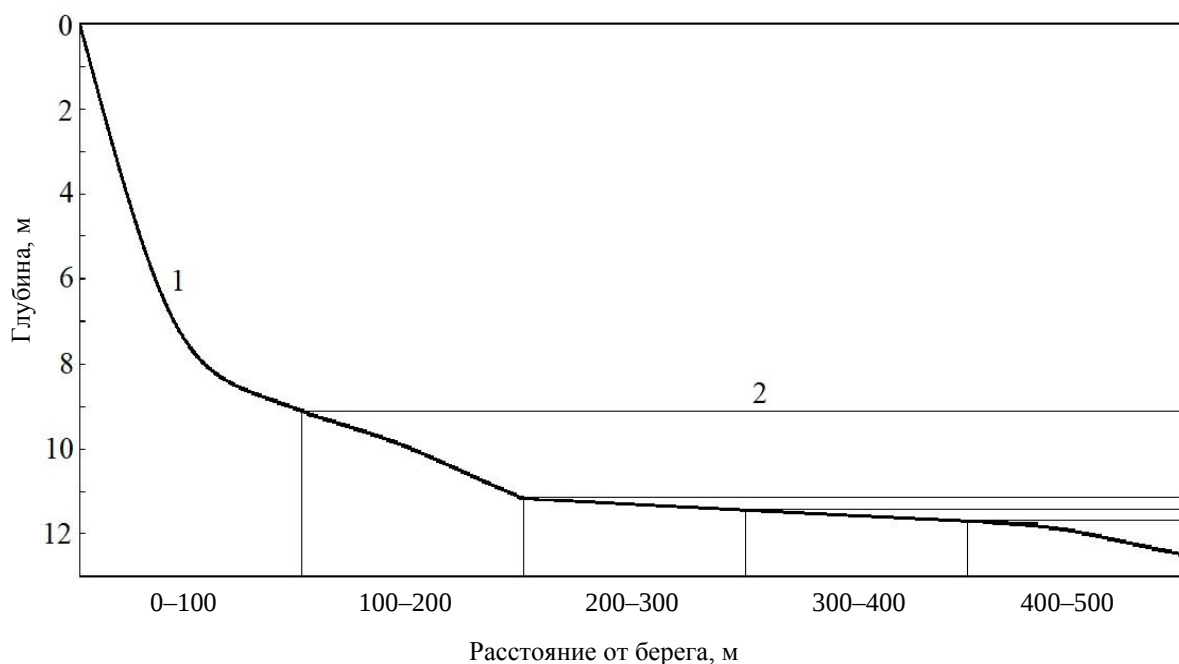


Рис. 2. Профиль дна (1) обследованной акватории Верхнетуломского водохранилища; границы водных слоев (2), соответствующих разноудаленным от берега участкам

Fig. 2. Depth profile (1) of the surveyed water area of the Verkhnetulomsky reservoir; boundaries of the water layers (2) corresponding to areas at different distances from the shore

Численность налима. В качестве показателя, характеризующего ее уровень, использовался средний по каждому участку вылов на одно орудие лова. В пределах участков 0–100 и 100–200 м от берега он составил 0,2 и 0,21 экз. на самолет в сутки соответственно. На участках 200–300 и 300–400 м вылов находился на уровне 0,6 и 0,71 экз. соответственно. Далее 400 м от берега поклевки отсутствовали (рис. 3).

Возрастной состав налима. До 100 м от берега вылавливались только особи в возрасте 6+ и 7+. На участке 100–200 м в улове присутствовали налимы в возрасте 6, 7 и 8 полных лет. В полосе акватории

с границами 200 и 300 м от берега возраст налимов варьировал от 6+ до 9+, на участке 300–400 м – от 6+ до 11+ (рис. 3).

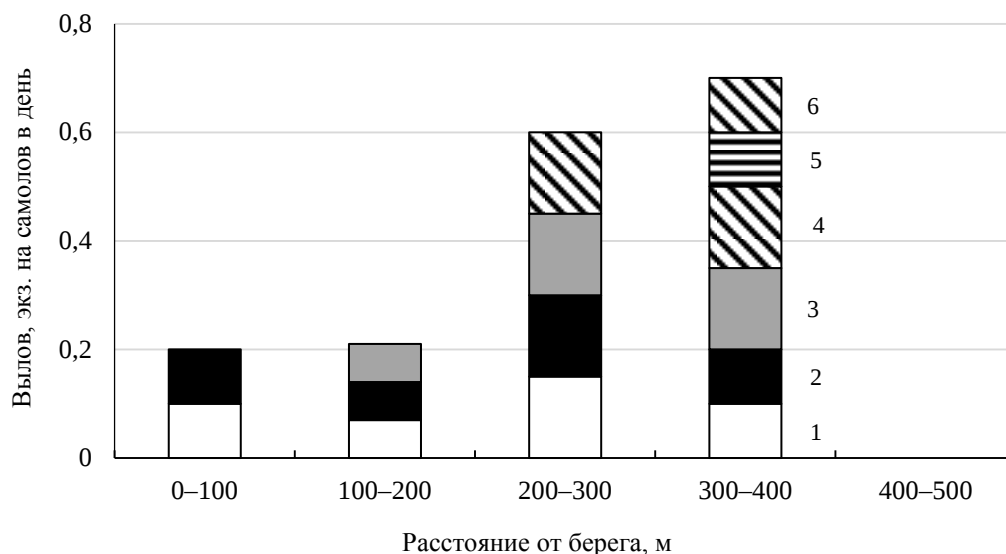


Рис. 3. Средний вылов налима (экз./на самолов в день) по участкам акватории Верхнетуломского водохранилища с различной удаленностью от берега, в том числе рыб в возрасте 6+ (1), 7+ (2), 8+ (3), 9+ (4), 10+ (5) и 11+ (6)

Fig. 3. Average catch of burbot per fishing rod per day in the areas of the surveyed water area reservoir with various distances from the shore, including fish aged 6+ (1), 7+ (2), 8+ (3), 9+ (4), 10+ (5) and 11+ (6)

Половая характеристика налима. Для рыб этого вида в Верхнетуломском водохранилище характерно созревание в возрасте 3+ и завершение нереста к началу марта (Неличик, 1973). Следовательно, все обследованные рыбы, минимальный возраст которых составлял 6+, недавно участвовали в нересте. Это подтверждается и визуальными оценками состояния гонад обследованных рыб, зрелость которых соответствовала стадии VI–II.

Доля самок среди пойманных налимов варьировала по участкам от 25 до 70 % и поступательно возрастала по мере удаления от берега (рис. 4).

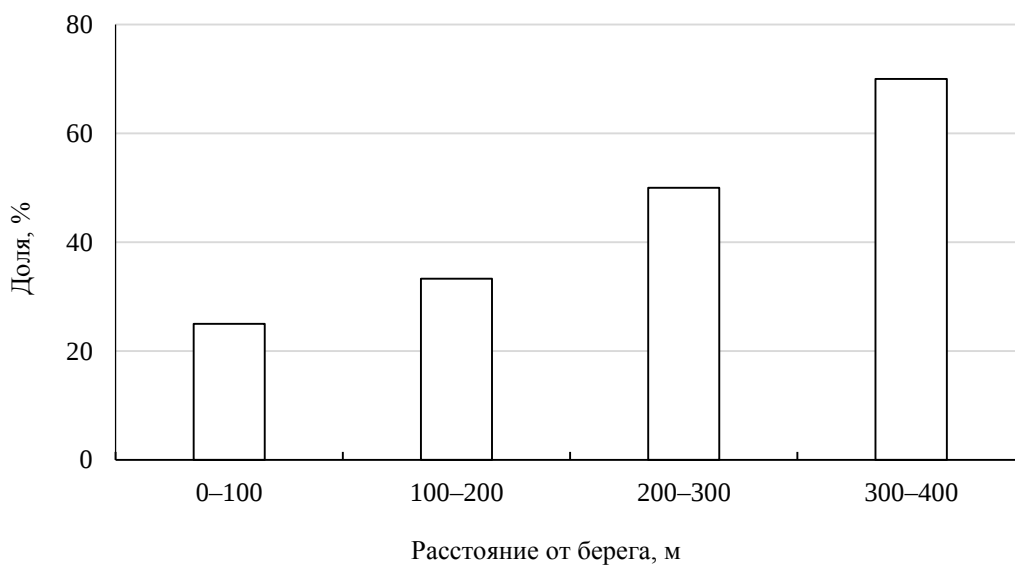


Рис. 4. Доля самок среди обследованных налимов по участкам акватории Верхнетуломского водохранилища с различной удаленностью от берега

Fig. 4. The proportion of females among the surveyed burbot by area of the water area of the Verkhnetulomsky reservoir with varying distances from the coast

Преобладание самцов было наиболее заметным среди рыб в возрасте 6+ и 7+. У налимов возрастной группы 8+ количество самцов и самок выравнивалось. Среди особей в возрасте 9+ самки составляли 60 %. Налимы в возрасте 10+ и 11+ были исключительно самками (рис. 5).

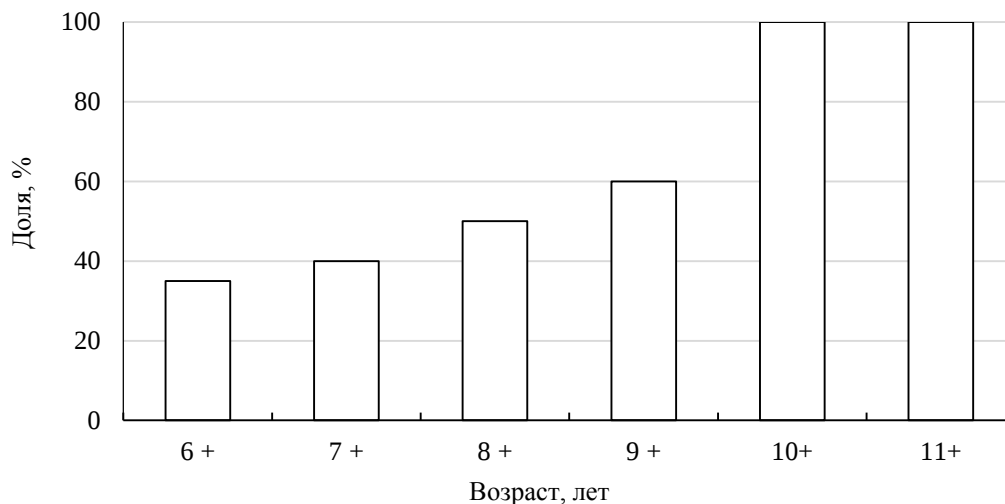


Рис. 5. Доля самок среди налимов разных возрастных групп на обследованном участке акватории Верхнетуломского водохранилища

Fig. 5. The proportion of females among burbot of different age groups in the surveyed area of the Verkhnetulomsky reservoir

Возможные нерестилища налима. Все исследователи сходятся во мнении, что в озерах и водохранилищах его нерест происходит на отмелях с глубиной не более 5 м (Сорокин, 1976; Сергеев, 1959; Георгиев и др., 2022; Heather et al., 2016 и мн. др.). Соответственно, в обследованном районе водохранилища нерестилища рыб этого вида могли располагаться только в узкой прибрежной полосе участка 0–100 м (рис. 2).

Питание налима. Все обследованные рыбы, независимо от места поимки, имели слабое или среднее наполнение желудков, содержимое которых состояло из бентосных беспозвоночных.

Судя по вылову на орудие лова, численность налимов на участках 200–300 и 300–400 м от берега превосходила ее уровень на участках 0–100 и 100–200 м в 3–3,5 раза (рис. 3). Наименьшие показатели численности отмечались на глубинах до 10,8 м (участки 0–100 и 100–200 м), высокие – на глубине от 10,8 до 11,2 м (участок 200–300 м) и максимальные – между горизонтами глубины 11,2 и 11,8 м (участок 300–400 м). На глубине более 11,8 м налим отсутствовал (рис. 2, 3).

Наряду с неравномерностью количественного распределения, по участкам акватории наблюдались и значительные различия возрастного состава рыб. Так, особи в возрасте 6+ и 7+ учитывались на всем протяжении зоны 0–400 м, при этом достигшие возраста 8+, 9+, а также 10+ и старше, встречались не ближе 100, 200 и 300 м от берега соответственно (рис. 3). При этом налимы в возрасте 6+ и 7+ распределялись по всему доступному диапазону глубин, а в возрасте 8+, 9+, а также 10+ и старше – на глубинах не менее 9,2, 10,8 и 11,2 м соответственно (рис. 2, 3).

На фоне перечисленных особенностей распространения налима по мере удаления от берега происходило изменение его полового состава – доля самок возрастала с 25 % на глубинах до 9,2 м (участок 0–100 м) до 70 % на глубинах от 11,2 до 11,8 м (участок 300–400 м) (рис. 4).

Обсуждение

Анализ представленных материалов показывает, что после завершения нереста подавляющая часть налимов в возрасте 6+ и 7+ и все налимы в возрасте 8+ и старше покинули прибрежные мелководья, где обычно располагаются нерестилища рыб этого вида, и удалились от берега, сместившись в глубину. При этом их распространение оказалось ограничено прибрежной полосой акватории шириной около 400 м и максимальной глубиной 11,8 м. В ее пределах особи в возрасте 6+ и 7+ встречались повсеместно, распределяясь относительно равномерно по всему диапазону глубин, а достигшие возраста 8, 9, 10 и более полных лет отмечались на глубинах не менее 9,2, 10,8 и 11,2 м соответственно (рис. 2, 3).

Закономерным результатом указанных различий в распространении разновозрастных налимов стала неравномерность распределения их численности, которая демонстрировала прямую связь с разнообразием возрастного состава рыб. Так, количество рыб было минимальным на глубинах до 10,8 м, где были обнаружены налимы только 2-х и 3-х возрастных групп. Далее оно значительно возрастало между горизонтами глубины 10,8 и 11,2 м, где учитывались особи 4-х возрастных категорий. Максимум численности отмечался между отметками глубины 11,2 и 11,8 м, где встречались налимы шести возрастных групп (рис. 2, 3). Примечательно,

что при наличии значительных глубин на большей части обследованной зоны высокая и максимальная численность налимов отмечалась только в полосе акватории с глубиной от 10,8 до 11,8 м, т. е. в слое воды, который занимал значительную часть площади дна, но имел высоту всего около 1 м. Очевидно, это обстоятельство не является препятствием для обитания налимов, у которых и ранее отмечалась способность создавать плотные скопления в узкой полосе дна, соответствующей незначительному по высоте водному слою, примыкающему к термоклину, формирующемуся на глубине в период летней температурной стратификации (*Heather, 2016*).

Неоднородность распределения по глубине налимов разного возраста послужила и причиной формирования различий в распределении особей разного пола, обусловленных характерным для налима этого водоема преобладанием самок в старших возрастных группах: их доля поступательно увеличивалась с 25 % на глубинах до 9,2 м, где встречались только рыбы в возрасте от 6+ до 8+, до 70 % на глубинах 11,2–11,8 м, где значительную долю улова составили особи в возрасте от 9+ до 11+ (рис. 3, 4, 5).

Представленные данные показывают, что в посленерестовый период, приходящийся на конец гидрологической зимы, область обитания половозрелых налимов в возрасте от 6+ до 11+ была ограничена прибрежной частью водохранилища. В ее пределах наблюдались значительные различия в распределении по глубине самок и самок, а также общей численности налимов, которые, в свою очередь, были обусловлены спецификой распределения по горизонтам глубины разновозрастных особей.

Известно, что вне времени нереста и нерестовых миграций перераспределение рыб по водоему обусловлено их адаптацией к условиям обитания, направленной на поиск зон с наиболее оптимальным сочетанием температурного и кислородного режимов, а также кормовых ресурсов. В рассматриваемом случае обеспеченность пищей не могла существенно влиять на распределение налимов, поскольку их рацион и уровень накормленности в разных местах обследованной акватории характеризовались значительным сходством. Кроме того, данный подход не объясняет причин формирования максимальной концентрации рыб вблизи внешнего края зоны распространения при их практически полном отсутствии сразу за ее пределами.

Существование четко выраженной внешней границы распространения налимов указывает на наличие условий, жестко лимитирующих их удаление от берега. Вполне вероятно, что в этом случае играют роль высокая требовательность рыб этого вида к содержанию кислорода и газовый режим водоема, формирующийся к концу гидрологической зимы. Так, в других водоемах отмечались случаи задержки налимов после нереста в прибрежной зоне в связи со значительным снижением сатурации глубинных слоев воды, характерным для всех глубоких слабопроточных водоемов во второй половине периода ледостава (*Chambers et al., 2000; Heather, 2016*). Уменьшение с глубиной уровня растворенного кислорода отмечалось и в Верхнетуломском водохранилище в первые годы его существования – по архивным данным за февраль – март 1967 г., на разных участках этого водоема снижение сатурации отмечалось с глубин от 7 до 11 м¹. Исходя из перечисленного, в качестве наиболее вероятной причины обитания налимов исключительно в прибрежной зоне водохранилища следует рассматривать наличие удаленного от берега глубинного слоя воды с низким содержанием кислорода. Судя по нашим данным, он начинался примерно в 400 м от берега, а его поверхность соответствовала горизонту глубины 11,8 м (рис. 2, 3).

Менее очевидно возможное влияние на распределение налимов температурного фактора. Имеющиеся данные о температуре воды, предпочитаемой ими в ближайшее после нереста время, крайне малочисленны и, кроме того, неоднозначны вследствие естественных различий термического режима и батиметрии исследованных водоемов. Тем не менее на роль температуры в процессе посленерестового распределения налимов указывают, например, результаты наблюдений на водохранилище Кингбаскет (Канада), где после нереста только 30 % рыб предпочитали оставаться на мелководьях с температурой воды менее 2 °С, а остальные выбирали места обитания на глубинах с температурой воды от 2 до 4 °С (*Harrison et al., 2016*). Отметим, что в общих чертах сходное распределение численности налимов по глубине наблюдалось и в рассматриваемом случае (рис. 2, 3). Кроме того, несомненный интерес представляет и лабораторный эксперимент, в ходе которого был установлен заметный рост температуры, предпочитаемой взрослыми налимами по мере увеличения их длины (*Hofmann et al., 2002*). Его результаты однозначно свидетельствуют о наличии размерных и, соответственно, возрастных различий термического предпочтения у взрослых рыб этого вида. Хотя этот эксперимент проводился в условиях значительного изменения температур, характерного для водоемов в летний период, допустимо предположить, что эти различия проявляются у налимов и в зимнее время, когда температура воды изменяется в незначительных пределах, а ее стратификация имеет обратный, по сравнению с летним сезоном, характер.

Известно, что в зимний период в слабопроточных глубоких водоемах температура воды близка к точке замерзания в подледном слое и повышается по мере увеличения глубины, в определенных условиях приближаясь к возможному максимуму 4 °С². Похожее по общей динамике явление отмечалось и в начальный

¹ Обзор условий и хода промысла рыбы на Верхнетуломском водохранилище в 1966 и 1967 годах // Отчет о НИР. Мурманск, ПИНРО, 1968. 120 с.

² Одрова Т. В. Гидрофизика водоемов суши. Л. : Гидрометеиздат, 1979. 311 с.

период существования Верхнетуломского водохранилища: в феврале и марте температура подледного слоя воды не превышала 0,1 °С, а с погружением к 10 м увеличивалась до 0,8–1,0 °С, при этом некоторое ускорение ее роста фиксировалось между горизонтами глубин 7–10 м³. Исходя из этой информации можно сделать вывод, что налимы в возрасте 6+ и 7+ равномерно распределялись по всем диапазонам доступной глубины и, соответственно, температуры. При этом налимы в возрасте 8+ и старше концентрировались только на наиболее значительных глубинах и, следовательно, в наиболее теплых слоях воды. В свою очередь, по мере увеличения возраста рыб категории 8+ и старше увеличивалась минимальная глубина и, соответственно, минимальная температура среды их обитания.

Эти данные позволяют рассматривать гипотезу о возрастных различиях зимнего термического преферендума у половозрелых налимов в возрасте 8 и более полных лет, проявляющихся в увеличении с возрастом уровня предпочитаемой температуры. Хотя ввиду недостатка данных ее доказательство требует дополнительных исследований, отметим, что на основании этой гипотезы выстраивается четкий алгоритм, описывающий процесс формирования выявленных особенностей распространения налимов в Верхнетуломском водохранилище после нереста. Его первым этапом являлось смещение большей части налимов на глубину с мелководий, где в наиболее охлажденных слоях воды располагались нерестилища. На определенном удалении от берега налимы достигали слоя воды с быстрым снижением содержания кислорода, который и становился внешним пределом зоны их распространения. В ее границах рыбы распределялись, исходя из соответствующих их возрасту температурных предпочтений: особи в возрасте 6+ и 7+ достаточно равномерно по всему району распространения, осваивая все глубины и разные по температуре водные слои; прожившие 8 или более лет смещались в его удаленную от берега наиболее глубокую и теплую часть, а в ее пределах перераспределялись соответственно возрасту – рыбы старших возрастных групп выбирали более глубокие участки с несколько более высокой температурой воды.

Таким образом, представленные данные дают наглядную картину распространения половозрелых налимов Верхнетуломского водохранилища в посленерестовый период. Их анализ позволил затронуть слабо изученные аспекты биологии рыб этого вида и рассмотреть возможные причины выявленных особенностей их пространственного распределения. В завершение следует добавить, что в цели представленной работы не входило рассмотрение ее практической составляющей. Кратко отметим, что в практических целях представленные результаты могут применяться при определении районов промысла и величин промыслового и нерестового запаса налима.

Заключение

Результаты обследования одного из заливов Верхнетуломского водохранилища показывают, что в посленерестовый период, приходящийся на конец гидрологической зимы, половозрелые налимы в возрасте от 6+ до 11+ обитали исключительно в прибрежной полосе шириной 400 м, максимальная глубина которой составляла 11,8 м. В пределах этой зоны минимум численности рыб отмечался на глубинах до 10,8 м, максимум – между отметками глубины 11,2 и 11,8 м. При этом налимы в возрасте 6+ и 7+ встречались по всему диапазону глубин, а достигшие возраста 8, 9, 10 и более полных лет – на глубинах не менее 9,2, 10,8 и 11,2 м соответственно. Доля самок поступательно увеличивалась с 25 % на глубинах до 9,2 м до 70 % на глубинах 11,2–11,8 м.

Наиболее вероятной причиной обитания половозрелых налимов исключительно в прибрежной полосе водохранилища являлось расположение на глубине более 11,8 м слоя воды с низким содержанием кислорода. При этом выраженная неравномерность распределения численности налима внутри этой зоны объясняется спецификой распространения его особей разного возраста. Этим же фактором, в сочетании с характерным для налима данного водоема преобладанием самок в старших возрастных группах, были обусловлены и различия в распределении рыб разного пола. В свою очередь, неравномерность распределения по глубине налимов разных возрастных групп предположительно была связана с возрастными различиями температурного преферендума, проявляющимися у рыб 8 и более полных лет в росте уровня предпочитаемой температуры, происходящем по мере увеличения их возраста. Проверка этой гипотезы требует проведения дополнительных исследований.

В практических целях представленные результаты могут применяться при определении районов промысла и величин промыслового и нерестового запаса налима.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

³ Обзор условий и хода промысла рыбы на Верхнетуломском водохранилище в 1966 и 1967 годах // Отчет о НИР. Мурманск, ПИНРО, 1968. 120 с.

Библиографический список

- Биоресурсы Онежского озера / Лукин А. А. и др. ; отв. ред. В. И. Кухарев, А. А. Лукин. Петрозаводск : КарНЦРАН, 2008. 272 с.
- Богданов В. Д., Копориков А. Р. Зависимость величины промыслового улова производителей полупроходного налима *Lota lota* L. (Lotidae) от условий водности р. Оби // Аграрный Вестник Урала. 2009. № 9(63). С. 92–94. EDN: LHSMVZ.
- Георгиев А. П., Широков В. А., Черепанова Н. С., Коваленко В. Н. Особенности условий среды обитания, режима рыболовства и состояния популяции налима *Lota lota* L. в озерах-водохранилищах бассейна Белого моря (Республика Карелия) // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 4. С. 63–73. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-63-73>. EDN: HUPVGC.
- Криксунов Е. А., Чистов С. В., Васильев П. В., Бурменский В. А. Пространственно-временная динамика рыб Псковского озера // Журнал общей биологии. 2020. Т. 81, № 1. С. 3–19. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0044459620010042>. EDN: RHQLRV.
- Неличик В. А. Налим *Lotta lotta* L. Верхнетуломского водохранилища // Вопросы ихтиологии. 1973. Т. 13, № 6(83). С. 1001–1007.
- Неличик В. А. Ряпушка *Coregonus albula* L. и налим *Lotta lotta* L. Верхнетуломского водохранилища // Рыбохозяйственные исследования Верхнетуломского и Серебрянского водохранилищ Мурманской области : сб. науч. тр. Мурманск : ПИНРО, 1985. С. 72–85.
- Попова А. С., Шибаев С. В., Барановский П. Н. Особенности пространственного распределения налима (*Lota lota* L.) в озере Виштынецком // Балтийский морской форум : материалы VIII Междунар. Балтийского морского форума : в 6 т., Калининград, 5–10 октября 2020 года. Калининград : КГТУ, 2020. Т. 3. С. 95–99. EDN: QKFHUK.
- Рыбы Рыбинского водохранилища: популяционная динамика и экология / Ю. В. Герасимов и др. Ярославль : Филигрань, 2015. 417 с.
- Сергеев Р. С. Материалы по биологии налима Рыбинского водохранилища // Труды института биологии водохранилищ. 1959. Т. 1, Вып. 4. С. 235–258.
- Сорокин В. Н. Налим озера Байкал / отв. ред. Г. И. Галазий. Новосибирск : Наука : Сиб. отд-ние, 1976. 144 с.
- Харламов А. М., Коваленко В. Н. Рыбохозяйственная характеристика налима – *Lota lota* (L.) Онежского озера на современном этапе // Озера Евразии: проблемы и пути их решения : материалы II Междунар. конф., Казань, 19–24 мая 2019 г. Казань, 2019. Ч. 2. С. 346–351. EDN: SINPYK.
- Bergersen E. P., Cook M. F., Baldes R. J. Winter movements of burbot (*Lota lota*) during an extreme drawdown in Bull Lake, Wyoming, USA // Ecology of Freshwater Fish. 1993. Vol. 2. P. 141–145. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.1993.tb00094.x>.
- Bernard D. R., Parker J. F., Lafferty R. Stock assessment of burbot populations in small and moderate-size lakes // North American Journal of Fisheries Management. 1993. Vol. 13, Iss. 4. P. 657–675. DOI: [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(1993\)013<0657:SAOBPI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(1993)013<0657:SAOBPI>2.3.CO;2).
- Carl L. M. Sonic tracking of burbot in Lake Opeongo, Ontario // Transactions of the American Fisheries Society. 1995. Vol. 124, Iss. 1. P. 77–83. DOI: [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1995\)124<0077:STOBIL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1995)124<0077:STOBIL>2.3.CO;2).
- Chambers P. A., Brown S., Culp J. M., Lowell R. B. [et al.]. Dissolved oxygen decline in ice-covered rivers of northern Alberta and its effects on aquatic biota // Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery. 2000. Vol. 8. P. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1011491706666>.
- Cott P. A., Guzzo M. M., Chapelsky A. J., Milne S. W. [et al.]. Diel bank migration of Burbot (*Lota lota*) // Hydrobiologia. 2015. Vol. 757. P. 3–20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2257-6>.
- Edsall T. A., Kennedy G. W., Horns W. H. Distribution, abundance, and resting microhabitat of burbot on Julian's Reef, Southwestern Lake Michigan // Transactions of the American Fisheries Society. 1993. Vol. 122, Iss. 4. P. 560–574. DOI: [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1993\)122<0560:DAARMO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1993)122<0560:DAARMO>2.3.CO;2).
- Harrison P. M., Gutowsky L. F. G., Martins E. G., Patterson D. A. [et al.]. Diel vertical migration of adult burbot: A dynamic trade-off among feeding opportunity, predation avoidance, and bioenergetic gain // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2013. Vol. 70, Iss. 12. P. 1765–1774. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfas-2013-0183>.
- Harrison P. M., Gutowsky L. F. G., Martins E. G., Patterson D. A. [et al.]. Temporal plasticity in thermal-habitat selection of burbot *Lota lota* a diel-migrating winter-specialist // Journal of Fish Biology. 2016. Vol. 88, Iss. 6. P. 2111–2129. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfb.12990>.
- Harrison P. The behavioural ecology of burbot, *Lota lota*: Diel migrations, spatial behavioural syndromes, and behavioral thermoregulation in a reservoir resident. Thesis. Waterloo, Ontario, Canada. 2015. 209 p. URL: <https://dspacemainprd01.lib.uwaterloo.ca/server/api/core/bitstreams/ddaee7e1-223f-4202-977c-132022c9c2db/content>.

- Hofmann N., Fischer P. Temperature preferences and critical thermal limits of burbot: Implications for habitat selection and ontogenetic habitat shift // *Transactions of the American Fisheries Society*. 2002. Vol. 131, Iss. 6. P. 1164–1172. DOI: [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(2002\)131<1164:TPACTL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(2002)131<1164:TPACTL>2.0.CO;2).
- Klein Z. B., Terrazas M. M., Quist M. C. Age estimation of burbot using pectoral fin rays, branchiostegal rays and otoliths // *Intermountain Journal of Sciences*. 2014. Vol. 20, N 4. P. 57–67.
- Scannell H. Seasonal thermal habitat use and bathymetric distribution of burbot in Tanada and Copper lakes, Alaska. University of Alaska Fairbanks. December 2016. URL: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/7311> (accessed 26.05.2023).
- Stapanian M. A., Madenjian C. P., Bronte C. R., Ebener M. P. [et al.]. Status of burbot populations in the Laurentian Great Lakes // *American Fisheries Society Symposium*. 2008. Vol. 59. P. 111–130. (Burbot: Ecology, management, and culture).
- Stapanian M. A., Paragamian V. L., Madenjian C. P., Jackson J. R. [et al.]. Worldwide status of burbot and conservation measures // *Fish and Fisheries*. 2010. Vol. 11, Iss. 1. P. 34–56. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2009.00340.x>.
- Toivonen J., Hudd R., Nystrand M., Österholm P. Climatic effects on water quality in areas with acid sulfate soils with commensurable consequences on the reproduction of burbot (*Lota lota* L.) // *Environmental Geochemistry and Health*. 2020. Vol. 42. P. 3141–3156. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00550-1>.

References

- Bioresources of Lake Onego. 2008. Eds. V. I. Kukharev, A. A. Lukin. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. (In Russ.)
- Bogdanov, V. D., Koporikov, A. R. 2009. Dependence of the size of the commercial catch of producers of migrating burbot *Lota lota* L. (Lotidae) on the conditions of the water content of the river Ob. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 9(63), pp. 92–94. EDN: LHSMVZ. (In Russ.)
- Georgiev, A. P., Shirokov, V. A., Cherepanova, N. S., Kovalenko, V. N. 2022. Characteristics of habitat, fishing regime and state of burbot *Lota lota* L. population in lakes-reservoirs of White Sea basin (Republic of Karelia). *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*, 4, pp. 63–73. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-63-73>. EDN: HUPVGC. (In Russ.)
- Kriksunov, E. A., Chistov, S. V., Vasiliev, P. V., Burmensky, V. A. 2020. Spatiotemporal dynamics of fish of Pskov Lake. *Journal of General Biology*, 81(1), pp. 3–19. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0044459620010042>. EDN: RHQLRV. (In Russ.)
- Nelichik, V. A. 1973. Burbot *Lota lota* L. in the Verkhnetulomsky reservoir. *Questions of Ichthyology*, 13(6(83)), pp. 1001–1007. (In Russ.)
- Nelichik, V. A. 1985. Ryapushka *Coregonus albula* L. and burbot *Lota lota* L. in the Verkhnetulomsky reservoir. Fishery studies of the Verkhnetulomsky and Serebryansky reservoirs of the Murmansk region. Murmansk, PINRO, pp. 72–85. (In Russ.)
- Popova, A. S., Shibaev, S. V., Baranovsky, P. N. 2020. Features of the spatial distribution of burbot (*Lota lota* L.) in Lake Vistynetsky. *Mat. VIII Intern. Scien. Conf. Aquatic bioresources, aquaculture and ecology of reservoirs*. Kaliningrad, pp. 95–99. EDN: QKFHKU. (In Russ.)
- Fish of the Rybinsk reservoir: Population dynamics and ecology. 2015. Ed. Yu. V. Gerasimov. Yaroslavl. (In Russ.)
- Sergeev, R. S. 1959. Materials on the biology of burbot of the Rybinsk reservoir. *Tr. Institute of Biology of Reservoirs*, 1959, 1(4), pp. 235–258. (In Russ.)
- Sorokin, V. N. 1976. Burbot of Lake Baikal. Ed. G. I. Galaziy. Novosibirsk. (In Russ.)
- Kharlamov, A. M., Kovalenko, V. N. 2019. Fishery characteristics of burbot *Lota lota* (L.) of Lake Onega at the present stage. *Mat. II Inter. Conf. Lakes of Eurasia: Problems and ways to solve them*. Kazan, pp. 346–351. EDN: SINPYK. (In Russ.)
- Bergersen, E. P., Cook, M. F., Baldes, R. J. 1993. Winter movements of burbot (*Lota lota*) during an extreme drawdown in Bull Lake, Wyoming, USA. *Ecology of Freshwater Fish*, 2, pp. 141–145. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.1993.tb00094.x>.
- Bernard, D. R., Parker, J. F., Lafferty, R. 1993. Stock assessment of burbot populations in small and moderate-size lakes. *North American Journal of Fisheries Management*, 13(4), pp. 657–675. DOI: [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(1993\)013<0657:SAOBPI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(1993)013<0657:SAOBPI>2.3.CO;2).
- Carl, L. M. 1995. Sonic tracking of burbot in Lake Opeongo, Ontario. *Transactions of the American Fisheries Society*, 124(1), pp. 77–83. DOI: [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1995\)124<0077:STOBIL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1995)124<0077:STOBIL>2.3.CO;2).
- Chambers, P. A., Brown, S., Culp, J. M., Lowell, R. B. et al. 2000. Dissolved oxygen decline in ice-covered rivers of northern Alberta and its effects on aquatic biota. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 8, pp. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1011491706666>.
- Cott, P. A., Guzzo, M. M., Chapelsky, A. J., Milne, S. W. et al. 2015. Diel bank migration of Burbot (*Lota lota*). *Hydrobiologia*, 757, pp. 3–20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2257-6>.

- Edsall, T. A., Kennedy, G. W., Horns, W. H. 1993. Distribution, abundance, and resting microhabitat of burbot on Julian's Reef, Southwestern Lake Michigan. *Transactions of the American Fisheries Society*, 122(4), pp. 560–574. DOI: [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1993\)122<0560:DAARMO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1993)122<0560:DAARMO>2.3.CO;2).
- Harrison, P. M., Gutowsky, L. F. G., Martins, E. G., Patterson, D. A. et al. 2013. Diel vertical migration of adult burbot: A dynamic trade-off among feeding opportunity, predation avoidance, and bioenergetic gain. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 70(12), pp. 1765–1774. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfas-2013-0183>.
- Harrison, P. M., Gutowsky, L. F. G., Martins, E. G., Patterson, D. A. et al. 2016. Temporal plasticity in thermal-habitat selection of burbot *Lota lota* a diel-migrating winter-specialist. *Journal of Fish Biology*, 88(6), pp. 2111–2129. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfb.12990>.
- Harrison, P. 2015. The behavioural ecology of burbot, *Lota lota*: Diel migrations, spatial behavioural syndromes, and behavioral thermoregulation in a reservoir resident. Thesis. Waterloo, Ontario, Canada. URL: <https://dspacesmainprd01.lib.uwaterloo.ca/server/api/core/bitstreams/ddaee7e1-223f-4202-977c-132022c9c2db/content>.
- Hofmann, N., Fischer, P. 2002. Temperature preferences and critical thermal limits of burbot: Implications for habitat selection and ontogenetic habitat shift. *Transactions of the American Fisheries Society*, 131(6), pp. 1164–1172. DOI: [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(2002\)131<1164:TPACTL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(2002)131<1164:TPACTL>2.0.CO;2).
- Klein, Z. B., Terrazas, M. M., Quist, M. C. 2014. Age estimation of burbot using pectoral fin rays, branchiostegal rays and otoliths. *Intermountain Journal of Sciences*, 20(4), pp. 57–67.
- Scannell, H. 2016. Seasonal thermal habitat use and bathymetric distribution of burbot in Tanada and Copper lakes, Alaska. University of Alaska Fairbanks. December 2016. URL: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/7311> (accessed 26.05.2023).
- Stapanian, M. A., Madenjian, C. P., Bronte, C. R., Ebener, M. P. et al. 2008. Status of burbot populations in the Laurentian Great Lakes. *American Fisheries Society Symposium*, 59, pp. 111–130. (Burbot: Ecology, management, and culture).
- Stapanian, M. A., Paragamian, V. L., Madenjian, C. P., Jackson, J. R. et al. 2010. Worldwide status of burbot and conservation measures. *Fish and Fisheries*, 11(1), pp. 34–56. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2009.00340.x>.
- Toivonen, J., Hudd, R., Nystrand, M., Österholm, P. 2020. Climatic effects on water quality in areas with acid sulfate soils with commensurable consequences on the reproduction of burbot (*Lota lota* L.). *Environmental Geochemistry and Health*, 42, pp. 3141–3156. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00550-1>.

Сведения об авторах

Долотов Сергей Иванович – ул. Академика Книповича, 6, г. Мурманск, Россия, 183038; Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии ("ПИНРО" им. Н. М. Книповича), канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: dolotov@pinro.vniro.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8541-2068>

Sergei I. Dolotov – 6 Akademika Knipovicha Str., Murmansk, Russia, 183038; Polar Branch of All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography ("PINRO" named after N. M. Knipovich), Cand. Sci. (Biology), Researcher; e-mail: dolotov@pinro.vniro.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8541-2068>

Потуткин Александр Геннадиевич – ул. Академика Книповича, 6, г. Мурманск, Россия, 183038; Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии ("ПИНРО" им. Н. М. Книповича), канд. биол. наук, науч. сотрудник; e-mail: potutkin@pinro.vniro.ru

Aleksandr G. Potutkin – 6 Akademika Knipovicha Str., Murmansk, Russia, 183038; Polar Branch of All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography ("PINRO" named after N. M. Knipovich), Cand. Sci. (Biology), Researcher; e-mail: potutkin@pinro.vniro.ru

УДК 663.05

Характеристика ферментированных овощей и фруктов, их пищевая ценность и влияние на здоровье. Обзор предметного поля

Л. Ч. Бурак

*Общество с ограниченной ответственностью "БЕЛПРОСАКВА", г. Минск, Республика Беларусь;
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>*

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
29.09.2025;

принята
к публикации
12.05.2026

Ключевые слова:

ферментация,
фрукты,
овощи,
биологически активные
соединения,
пищевая ценность,
микроорганизмы,
бактерии,
грибы,
токсины,
антиоксидантная
активность,
здоровье

В последние годы значительно возрос интерес производителей продуктов питания к разработке немолочных пробиотических продуктов на основе фруктов и овощей, что связано с изменениями в образе жизни и увеличением популярности вегетарианства и веганства. Цель исследования – анализ и обзор результатов исследований роли микроорганизмов в процессе естественной ферментации и искусственной инокуляции ферментированных фруктов и овощей с точки зрения пользы для здоровья, формирования вкуса и влияния на изменения биологически активных веществ. В качестве источников использованы научные публикации на русском и английском языках, опубликованные в 2010–2025 гг. Поиск зарубежных работ проводился в базах данных Scopus, PubMed и Web of Science; русскоязычные источники отбирались в системе РИНЦ по релевантным ключевым словам. Отобранные источники были подвергнуты систематизации, критическому анализу и обобщению. Технология ферментации является методом переработки, сочетающей традиции и инновации и использующей микробную биотрансформацию для значительного улучшения химического состава и биологической активности фруктов и овощей. Ферментация не только продлевает срок годности пищевых продуктов, но и повышает их пищевую ценность и пользу для здоровья. Обзор научных исследований показывает, что влияние ферментированных фруктов и овощей на здоровье в значительной степени зависит от микроорганизмов, участвующих в процессе ферментации, и биоактивных компонентов, которые они производят. Польза ферментированных фруктов и овощей для здоровья в основном обусловлена образованием в процессе ферментации биологически активных соединений, таких как фенолы, витамины, минералы и органические кислоты. Эти соединения образуются в результате сложных биохимических реакций, катализируемых микроорганизмами, и взаимодействуют друг с другом, оказывая антиоксидантное и противовоспалительное действие, что приводит к таким полезным для здоровья свойствам, как снижение риска хронических заболеваний. Биологически активные соединения ферментированных фруктов и овощей обладают антиоксидантным, противовоспалительным и гипогликемическим действиями. Разработка ферментированных продуктов на основе фруктов и овощей представляет собой перспективное направление для удовлетворения запросов современного потребителя, сокращения отходов растительного сырья, расширения ассортимента функциональных пищевых продуктов, способствующих улучшению здоровья населения. Дальнейшие исследования должны быть направлены на углубленное изучение взаимодействия микроорганизмов с плодовоовощным сырьем и оптимизацию процесса ферментации с целью повышения их пищевой ценности и благотворного влияния на здоровье.

Для цитирования

Бурак Л. Ч. Характеристика ферментированных овощей и фруктов, их пищевая ценность и влияние на здоровье. Обзор предметного поля. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 452–478. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-452-478>.

Characteristics of fermented vegetables and fruits, their nutritional value and impact on health. A review of the subject field

Leonid Ch. Burak

Limited Liability Company "BELROSAKVA", Minsk, Republic of Belarus;
e-mail: leonidburak@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Article info

Received
29.09.2025;

accepted
12.05.2026

Key words:

fermentation,
fruits,
vegetables,
bioactive compounds,
nutritional value,
microorganisms,
bacteria,
fungi,
toxins,
antioxidant activity,
health

Abstract

In recent years, food manufacturers have shown significant interest in developing non-dairy probiotic products based on fruits and vegetables, driven by lifestyle changes and the increasing popularity of vegetarianism and veganism. The aim of this study is to analyze and review research on the role of microorganisms in the natural fermentation and artificial inoculation of fermented fruits and vegetables in terms of health benefits, flavor formation, and influence on changes in biologically active substances. The sources used are scientific publications in Russian and English published between 2010 and 2025. A search for international publications has been conducted in Scopus, PubMed, and Web of Science; Russian-language sources have been selected using the Russian Science Citation Index (RSCI) system with the help of relevant keywords. The selected sources are systematized, critically analyzed, and summarized. Fermentation technology is a processing method that combines tradition and innovation, using microbial biotransformation to significantly improve the chemical composition and biological activity of fruits and vegetables. Fermentation not only extends the shelf life of foods but also enhances their nutritional value and health benefits. A review of scientific research shows that the health effects of fermented fruits and vegetables depend largely on the microorganisms involved in the fermentation process and the bioactive components they produce. The health benefits of fermented fruits and vegetables are primarily due to the formation of bioactive compounds during fermentation, such as phenols, vitamins, minerals, and organic acids. These compounds are formed through complex biochemical reactions catalyzed by microorganisms and interact with each other, exerting antioxidant and anti-inflammatory effects, resulting in health benefits such as a reduced risk of chronic diseases. Bioactive compounds in fermented fruits and vegetables exhibit antioxidant, anti-inflammatory, and hypoglycemic effects. The development of fermented fruit and vegetable products represents a promising approach to meeting the needs of modern consumers, reducing waste of plant materials, and expanding the range of functional foods that contribute to improved public health. Further research should be aimed at in-depth study of the interaction of microorganisms with fruit and vegetable raw materials and optimization of the fermentation process, with the aim of increasing their nutritional value and beneficial effects on health.

For citation

Burak, L. Ch. 2026. Characteristics of fermented vegetables and fruits, their nutritional value and impact on health. A review of the subject field. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 452–478. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-452-478>.

Введение

В настоящее время на мировом рынке продуктов питания представлено около 5000 ферментированных пищевых продуктов и наблюдается значительный ежегодный рост. Ферментированные фруктовые и овощные продукты составляют значительную часть этих продуктов, они популярны благодаря своей уникальной текстуре, вкусу и пользе для здоровья. История ферментированных продуктов насчитывает тысячи лет, и некоторые традиционные ферментированные продукты по-прежнему пользуются популярностью у потребителей во многих странах (Burak, 2023; Chen et al., 2024). Ферментированные фрукты и овощи богаты фенольными соединениями, минералами и витаминами, которые имеют потенциальную пользу для здоровья, способствуя предотвращению многих заболеваний, таких как сердечно-сосудистые заболевания и диабет 2 типа (Abdelshafy et al., 2024; Eroglu et al., 2023).

Хотя молочные и мясные продукты представляют собой две основные категории ферментированных продуктов, растет потребность в исследованиях и разработках немолочных пробиотических продуктов на основе фруктов и овощей в свете изменения образа жизни (например, вегетарианства и веганства), а также роста аллергии и непереносимости лактозы на молочные продукты (Burak, 2025b). Технология ферментации привлекает внимание как потенциальный способ обработки продуктов питания с целью увеличения срока годности, питательных свойств и пользы для здоровья. Ферментированные фрукты и овощи могут быть получены естественными или искусственно контролируемыми процессами ферментации с участием микроорганизмов, в основном из групп бактерий и грибов (Burak, 2025b; Cai et al., 2022; Pérez-Armendáriz et al., 2020). Преобразование и высвобождение биоактивных соединений во фруктах и овощах в процессе ферментации увеличивает пищевую ценность и благотворное влияние ферментированных продуктов на здоровье (Burak, 2024; Fahey et al., 2021). Микробная ферментация увеличивает во фруктах и овощах содержание полифенолов, таких как фенольные кислоты, флавоноиды и антоцианы, которые обладают высокой антиоксидантной способностью, снижая окисление липидов и риск атеросклероза. Некоторые молочнокислые бактерии (МКБ) способны продуцировать γ -аминомасляную кислоту (ГАМК), нейротрансмиттер со свойствами снижения кровяного давления и потенциальной регуляции липидов (Ali et al., 2021; Wang et al., 2023). Короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК), такие как уксусная, пропионовая и масляная кислоты, получаемые в процессе ферментации, не только полезны для здоровья кишечника, но и могут косвенно регулировать уровень липидов в крови, влияя на баланс кишечной флоры (Shin et al., 2020).

Микробная активность может увеличить содержание витаминов во фруктах и овощах, особенно витаминов С и В, которые обладают антиоксидантными свойствами и помогают поддерживать здоровье сосудов (Burak, 2024; da Silva et al., 2023b). Кроме того, пробиотики, используемые в процессе ферментации, такие как *Lactobacillus* spp., *Pediococcus* spp., способны положительно влиять на уровень липидов в крови как напрямую, так и через свои метаболиты (Chai et al., 2022; Wang et al., 2023). Следует отметить, что для создания продуктов, положительно влияющих на здоровье организма, исследователи отбирают пробиотики из натурально ферментированных продуктов и используют их для производства ферментированных фруктов и овощей в промышленных условиях (Burak, 2025a; Grujovic et al., 2022). Например, *Lactobacillus plantarum*, который широко встречается в естественно ферментированных продуктах, используется в производстве коммерческих ферментированных фруктов и овощей из-за его способности к ферментации и пробиотических свойств, таких как улучшение здоровья кишечника и повышение иммунитета (Burak, 2025a).

Таким образом, совершенствование методов выделения и очистки, а также оптимизация процесса ферментации стали ключевыми направлениями и задачами современных исследований по переработке ферментированных фруктов и овощей. В последние годы ассортимент ферментированных фруктов и овощей расширяется за счет растительного сырья с высокой пищевой ценностью и профилактическим действием (Burak et al., 2021). Лекарственное растительное сырье обладает как терапевтическими свойствами, так и может использоваться в качестве повседневной пищи, например, черная шелковица (Liu et al., 2023b; Lv et al., 2023). Целью добавления лекарственных продуктов в ферментированные фрукты и овощи является достижение биотрансформации и обогащение биологически активных ингредиентов в сырье посредством процессов ферментации, чтобы придать продуктам более существенные преимущества для сохранения здоровья. При этом активно изучается вариабельность биоактивных ингредиентов в ферментированных фруктах и овощах и их пищевая ценность.

Цель обзора – дать всестороннее представление роли микроорганизмов в процессе естественной ферментации и искусственной инокуляции ферментированных фруктов и овощей с точки зрения пользы для здоровья, формирования вкуса, влияния на пищевую ценность, органолептические показатели, изменения биологически активных соединений в процессе ферментации, включая образование и накопление органических кислот, витаминов, полифенолов и других биологически активных вторичных метаболитов.

Материалы и методы исследования

В качестве источников использованы научные публикации на русском и английском языках, опубликованные в 2010–2025 гг. Поиск зарубежных работ проводился в базах данных Scopus, PubMed и Web of Science; русскоязычные источники отбирались в системе РИНЦ по релевантным ключевым словам. Изначально в результате научного поиска проанализировано 672 научные статьи. В результате детального анализа для настоящего обзора были отобраны 174 научные публикации.

Критерии включения для статей, подлежащих анализу:

- 1) статья написана в период 2010–2025 гг.;
- 2) статья соответствует теме исследования;
- 3) типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи и краткие отчеты.

Критерии исключения для статей, подлежащих анализу:

- 1) статья не соответствует теме данного обзора: не касается тематики ферментации плодоовощного сырья, микробиологической характеристики процесса, качественных показателей ферментированных продуктов и их влияния на здоровье потребителя;
- 2) статья написана не на английском языке, статья на русском языке не входит в РИНЦ;
- 3) содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Отобранные источники были подвергнуты систематизации, критическому анализу и обобщению.

Результаты и обсуждение

1. Роль микроорганизмов в процессах ферментации

1.1. Бактерии в ферментированных фруктах и овощах

Микроорганизмы, обычно используемые в ферментированных продуктах, это бактерии, актиномицеты, дрожжи и плесень, из которых наиболее широко применяются бактерии, такие как *Lactobacillus* spp., *Pediococcus* spp., *Bacillus* spp. и *Zygomonas* spp. Бактериальная ферментация представляет собой сложный механизм биотрансформации, включающий микробные метаболические пути, которые преобразуют биоактивные молекулы в метаболиты во фруктах и овощах (Burak, 2025a; Liu et al., 2011). Процессы ферментации должны быть настроены для достижения целей продукта. При построении системы ферментации необходимо учитывать потребности в питательных веществах для роста микробов и соотношение каждого компонента в субстрате.

Некоторые исследования по бактериальной ферментации овощей и фруктов обобщены в табл. 1. Muhiyaldin et al. (2021) показали потенциал ферментированного сока канталупы (FFCJ) в качестве натурального консерванта путем добавления *L. plantarum* FBS05-FFCJ (мускатной дыни) к свежему соку канталупы в различных пропорциях. Ферментированный сок значительно улучшил антимикробную активность против *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Aspergillus flavus* и *Penicillium* spp. Срок годности ферментированного сока, при соотношении 20 : 80, был продлен до 6 месяцев с сохранением органолептических показателей качества. Wang et al. (2022d) получили выжимку из плодов розы роксбурга, ферментированную с помощью *Bacillus natto* (F-RRP), путем оптимизации инокулята, начального pH и т. д. Установлено, что ферментированный сок содержит высокое содержание растворимых пищевых волокон с рыхлой и пористой структурой, которая обладает сильной адсорбционной способностью к холестерину (ACX) (Wang et al., 2022e). Zhao и др. скорректировали содержание жира в матрице ферментации кокосового молока (КМ). Исследование показало, что использование смеси обезжиренного и жирного КМ в соотношении 3 : 2 или 2 : 3 для ферментации может дать более приятный на вкус продукт. КМ, ферментированный с использованием *L. plantarum* MWLp-4 и коммерческих штаммов, превосходил КМ, ферментированный с использованием только коммерческих штаммов с точки зрения текстуры и усвояемости, о чем свидетельствует сниженное выделение сыворотки, повышенное содержание экзополисахаридов и ферментативно усиленный гидролиз белка (Zhao et al., 2023b). Аналогичным образом Lan et al. (2023) использовали соотношение 1 : 2 *L. plantarum* CICC 20265 к *Levilactobacillus brevis* CICC 20269 для ферментации сока киви в течение 36 ч при 37 °C и получили ферментированный продукт с улучшенными вкусовыми свойствами.

Таблица 1. Характеристика биологически активных веществ в бактериально ферментированных фруктах и овощах
Table 1. Characteristics of biologically active substances in bacterially fermented fruits and vegetables

Род бактерий	Характеристика	Наименование сырья для ферментации и штаммы бактерий	Эффективность процесса ферментации	Источник
<i>Lactobacillus</i> spp.	Вырабатывает молочную кислоту. Подкисляет и благоприятно влияет на вкус продукта. Эффективный рост в анаэробных условиях	Яблочный сок. <i>Limosilactobacillus reuteria</i>	Изменения количественного и качественного содержания летучих веществ и органических кислот в ферментированных яблочных соках, приводящие к улучшению вкуса и аромата, а также увеличению антиоксидантной активности	<i>Ji et al., 2023</i>
		Манго. <i>Lactiplantibacillus plantarum</i> NCU116, <i>Lactobacillus acidophilus</i> NCU402 и <i>Lactobacillus casei</i> NCU215	Ферментация <i>LAB</i> оказала значительное влияние на уровень свободных аминокислот, нитритов и летучих соединений в соке манго	<i>Liu et al., 2023a</i>
		Сок облепихи. <i>Lactobacillus acidophilus</i> La-26, <i>Lactobacillus delbrueckii</i> subsp. <i>Bulgaricus</i> Lb-57, <i>Lactobacillus casei</i> Lc-630, <i>Lactobacillus plantarum</i> Lp-56	Снижение содержания сахара ↓, содержания титруемой кислоты ↑, количество жизнеспособных бактерий превысило 7 Log КОЕ/мл, а значения реакции на кислый вкус значительно увеличились ↑, в то время как горечь и терпкость значительно уменьшились ↓	<i>Liu et al., 2022</i>
		Яблочный сок и сок серебристого миндаля <i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Lactobacillus rhamnosus</i>	Количество лактобацилл, содержание тритерпеноидов, общее содержание фенолов и способность ABTS поглощать свободные радикалы ↑ (сок серебристого миндаля); летучие соединения вкуса, антиоксидантная активность и органолептические качества улучшились (яблочный сок)	<i>Saud et al., 2024</i>
<i>Lactocaseibacillus</i> spp.	Демонстрирует сильную кислотоустойчивость во время ферментации и может обладать противовоспалительными свойствами и иммуномодулирующим потенциалом	Сок манго. <i>Lactobacillus paracasei</i> OR1 (MK252696), PP1 (MK253713) и <i>Lactobacillus rhamnosus</i> MA3 (MK253673) и PP3 (MK253673)	Уровень восстанавливающих сахаров и полифенолов, а также антиоксидантная активность в мякоти манго ↑	<i>Laophongphit et al., 2023</i>
		Чеснок. <i>Lactobacillus casei</i> ATCC334	Антиоксидантная и антимикробная активность ферментированного чеснока ↑. Маринованная в чесноке баранина значительно улучшила влагоудерживающую способность, текстуру, сочность и общую усвояемость	<i>Hajar-Azhari et al., 2023</i>
		<i>Lactobacillus casei</i> SJRP38; молоко, маракуйя и бурити	Общее содержание фенолов и антиоксидантная активность ↑	<i>Borgonovi et al., 2021</i>
<i>Lactiplantibacillus</i> spp.	Ранее известный как <i>Lactobacillus plantarum</i> , он отличается быстрым ростом и способностью к ферментации, хорошей	<i>Lactobacillus plantarum</i> ; имбирь	Уровни летучих соединений, таких как зингиберен, α-куркумен, β-сесквифелландрен ↑, и изменение численности бактерий, улучшение его летучих вкусовых соединений	<i>Chen et al., 2023</i>
		<i>Lactobacillus plantarum</i> ; яблоко, груша, гранат и морковь	Улучшилась антиоксидантная активность, вкусовые и органолептические качества	<i>Saud et al., 2024</i>

	устойчивостью к кислотам, улучшает вкус и текстуру пищевых продуктов, а также стимулирует пищеварение	<i>Lactobacillus plantarum</i> D, <i>Lactobacillus plantarum</i> F; сок годжи	Общая кислотность, значительное снижение общего содержания сахара и pH ↑, содержание фенолов и флавоноидов ↑, что привело к повышению антиоксидантной активности ↑. Накопление индол-3-молочной кислоты	<i>Xie et al., 2023</i>
		<i>Lactobacillus plantarum</i> LpAv, <i>Lactobacillus plantarum</i> 73a; смузи из черники и арбуза	pH значительно ↓, в то время как общее содержание фенолов, антоцианов и показатели антиоксидантной активности (ABTS, DPPH) существенно не изменились. Кроме того, была отмечена продукция ГАМК штаммами с подтвержденной активностью гидролазы желчных солей	<i>Méndez-Galarraga et al., 2023</i>
<i>Pediococcus</i> spp.	Вырабатывает особые вкусовые вещества и способен вырабатывать антимикробные вещества, которые помогают подавлять рост нежелательных микроорганизмов	<i>Pediococcus ethanolidurans</i> M1117; перец	Содержание солености, нитритов и условно-патогенных микроорганизмов ↓ в ферментированном перце чили, а также его способность созревать быстрее, сохранять хрустящую текстуру и обеспечивать хорошую защиту цвета. Содержание капсаициноидов ↓, органических кислот, сладких аминокислот и летучих соединений, особенно сложных эфиров и терпенов ↑	<i>Li et al., 2023e</i>
		<i>Pediococcus pentosaceus</i> CCTCC AB2019253, <i>Pediococcus pentosaceus</i> CICC 21862; Брокколи (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>Italica</i>)	Общее содержание глюकोзинолатов и сульфорафанила значительно ↓, содержание сульфорафана значительно ↑, активность мирозиназы значительно ↓, а содержание органических кислот, витаминов и β-каротина варьировалось	<i>Xu et al., 2021b</i>
		<i>Pediococcus pentosaceus</i> CCTCC AB2019253, <i>Pediococcus pentosaceus</i> CICC 21862; Брокколи. <i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>	Концентрация одорантов, включая гексаналь, значительно изменилась, включая (E)-2-гексеналь и (Z)-3-гексен-1-ол. Относительная экспрессия пяти нелетучих метаболитов значительно изменилась. Сенсорная приемлемость и вкусовые характеристики ↑	<i>Xu et al., 2021a</i>
<i>Staphylococcus</i> spp.	Обеспечивает эффективное преобразование сахара в спирт и углекислый газ, улучшает здоровье кишечника хозяина	<i>Staphylococcus lactis</i> ATCC 11454, <i>Pediococcus pentosaceus</i> ATCC 10791; черничный сок	Антиоксидантная способность ↑, биодоступность и биоприемлемость фенолов ↑, содержание специфических фенолов (например, катехинов, кофейной кислоты, феруловой кислоты, популина, кумаровой кислоты и эруковой кислоты) ↑	<i>Gao et al., 2022</i>
		<i>Staphylococcus succinus</i> CICC 24360; перец чили	Образование аминокислот ↑, уровней органических кислот ↑, способствовало образованию уникальных вкусовых соединений, а также вкусу и качеству маринованного перца ↑	<i>Li et al., 2023e</i>

Примечание. ГАМК – гамма-аминомасляная кислота; МКБ – молочнокислые бактерии; ↑ – увеличение; ↓ – снижение.

Кроме того, оптимизация предварительной обработки сырья может быть более благоприятной для микробной ферментации, тем самым улучшая качество и пищевую ценность ферментированных продуктов. Wang et al. (2021b) использовали ультрафиолетовое излучение (УЗ-УФ) для предварительной обработки манго, а затем инокулировали молочнокислые бактерии (*Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* S1, *Streptococcus thermophilus* 6063 и *L. plantarum* Lp-115) с манго для ферментации и приготовления сока. Результаты показали, что предварительная обработка УЗ-УФ может значительно улучшить качество продуктов ферментации сока манго, а также эффективно влияет на стабильность при хранении и срок годности ферментированного сока в условиях охлаждения по сравнению со свежим соком и традиционной тепловой обработкой. Кроме того, добавление ингредиентов в матрицу ферментации, таких как необходимый микроэлемент селен, увеличивает потребление питательных веществ организмом, антиоксидантную активность и повышает иммунитет. Ферментированные фруктовые соки (ФФС) с добавлением селенита натрия (Na_2SeO_3), особенно виноградный сок, ферментированный с *Fructobacillus tropaeoli* CRL 2034 (штамм LAB), накапливали наибольшее количество селена и производили органические кислоты, такие как молочная кислота, маннит и уксусная кислота (Gaglio et al., 2021). Akter et al. (2022) ферментировали гранатовый сок с использованием ацилгидролазы танина и *Lactobacillus vespulae* DCY75, что значительно увеличило содержание эллаговой кислоты, общих флавоноидов (ОФВ) и фенолов. Ферментированный сок обладал более выраженными антиоксидантными свойствами и экспрессией рецепторов эстрогена. Добавление других продуктов питания или экстрагированных биоактивных веществ в матрицу ферментации также является перспективным для разработки функциональных продуктов питания. Lv et al. (2023) смешивали ферментированный сок черной шелковицы с молоком для приготовления ароматизированного напитка. Органолептическая оценка показала, что 25 % содержания молока в ферментированном соке была оптимальной, а антиоксидантная активность значительно увеличилась ($p < 0,01$), но биоактивные вещества и антиоксидантные свойства снижались в процессе хранения. Добавление молока увеличивало фенольную стабильность и генерировало новые терпеноиды и альдегиды, такие как 1-гептен, 6-метил и мезитилен. Однако в исследовании не проводился глубокий анализ белок-фенольных взаимодействий (Lv et al., 2023). Вместе с тем da Silva et al. (2023b) добавили пребиотические фруктоолигосахариды (включая 28 % трисахаридов 1-сахарозы и 27 % трисахаридов сахарозы) к соку, ферментированному *Lactocaseibacillus casei* В-442. Образцы из ферментированных соков самопроизвольного брожения, хранившихся в холодильнике в течение 0 дней, содержали более высокие уровни масляной кислоты, а через 30 дней в образцах были установлены и более высокие уровни пропионовой, изомасляной и уксусной кислот, а также снижение относительного количества *Firmicutes* и увеличение количества *Proteobacteria* и *Actinobacteria*. Это означает, что функциональные соки могут оказывать благотворное влияние и улучшать микробиоту кишечника.

Необходимо отметить, что при добавлении любого питательного вещества необходимо соблюдать правила безопасности для пищевых продуктов, чтобы гарантировать безопасность, эффективность и пользу для целевой группы населения. Кроме того, добавление питательных веществ не должно влиять на общий вкус и качество продукта, также необходимо учитывать pH продукта, совместимость ферментирующих микроорганизмов и стабильность питательных веществ в процессе производства и хранения. При этом ферментация используемого в лекарственных целях растительного сырья является еще одним способом производства функциональных продуктов питания. Плоды облепихи богаты питательными веществами и имеют высокую лекарственную ценность, так как эффективны для укрепления иммунитета, что может использоваться в процессе лечения заболеваний (Burak, 2021). В ходе исследования использовались смешанные штаммы для ферментации облепихи с целью получения облепихового сока с антиоксидантными свойствами и менее кислым вкусом. Смешанные штаммы состояли из 30 % *Zymomonas mobilis*, 5 % *L. casei*, 13,75 % *L. plantarum*, 31,25 % *Pediococcus acidilactici*, 12,5 % *Ligilactobacillus animalis* и 7,5 % *Pediococcus pentosaceus*. Оптимальный процесс ферментации составлял 20 ч (37 °C), объем инокулята $4,08 \times 10^6$ КОЕ/мл и добавление сахара 2,98 %. Биоферментативная активность и содержание ОФК ферментированном соке были выше по сравнению с неферментированным соком облепихи (Liu et al., 2023b).

1.2. Грибы в ферментированных фруктах и овощах

В процессе переработки пищевых продуктов грибы могут расщеплять такие компоненты, как целлюлоза, в процессе переработки пищевых продуктов. Исследования по ферментации овощей и фруктов грибами кратко представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристика грибов и изменения в процессе ферментации
Table 2. Characteristics of fungi and changes during fermentation

Род	Характеристика	Виды грибов и матрица для ферментации	Установленные изменения и эффективность процесса ферментации	Источник
<i>Aspergillus</i> spp.	Способен вырабатывать различные ферменты, такие как протеаза, амилаза и целлюлаза, которые помогают расщеплять белки и углеводы. Обладает высокой устойчивостью к воздействию тепла и соли	<i>Aspergillus oryzae</i> KCCM 60241; соя, молотый красный перец	Активность амилазы и протеазы в соевой пасте и пасте из красного перца ↑, уровень азота аминотипа и антиоксидантная активность в соевых продуктах ↑	<i>Kim et al., 2022a</i>
		<i>Aspergillus oryzae</i> ; мука из семян финиковой пальмы	Содержание белка и сырого жира ↑. Содержание золы, клетчатки и антипитательных веществ ↓. Активность липазы, амилазы и протеазы в пищеварительном тракте значительно ↑. Количество гемоглобина, эритроцитов и лейкоцитов в крови значительно ↑	<i>Dawood et al., 2020</i>
		<i>Aspergillus niger</i> , <i>Trichoderma viride</i> ; апельсиновая корка	Активность комплексной целлюлазы значительно ↑. Растворимые пищевые волокна ↑. Адсорбция глюкозы и холестерина ↑. Ингибирующая активность α-амилазы ↑	<i>Yang et al., 2024</i>
<i>Saccharomyces</i> spp.	В основном используется в спиртовом брожении для превращения сахаров в спирт и углекислый газ. Характеризуется быстрым размножением и высокой толерантностью, способен выживать в средах с высоким содержанием сахара	<i>Saccharomyces boulardii</i> , <i>Saccharomyces bayanus</i> ; мякоть маракуйи и сметанного яблока	Содержание биоактивных соединений, таких как полифенолы, витамин С и каротиноиды, значительно изменилось. Мякоть кислых фруктов проявила значительную противовоспалительную активность и эффективно подавляла тепловой гемолиз	<i>Martinez-Mendoza et al., 2023</i>
		<i>Saccharomyces bayanus</i> Lalvin EC1118; киви, гранат и хурма	Вина из граната и киви оказались более полезными с точки зрения содержания полифенолов и противовоспалительного потенциала	<i>Paško et al., 2024</i>
		<i>Saccharomyces cerevisiae</i> J2861, <i>Kluyveromyces marxianus</i> J2853, <i>Bacillus rhamnosus</i> LG0262, <i>Pediococcus lactis</i> LG0259, и некоторые другие LAB. Экстракт киви	Антиоксидантная активность ↑, содержание полисахаридов, ГАМК и органических кислот ↑, а также типы и концентрации летучих соединений ↑	<i>Cai et al., 2022</i>
<i>Pichia</i> spp.	Применение не столь широко распространено, но их также можно использовать в спиртовом брожении и производстве некоторых органических кислот	<i>Pichia kudriavzevii</i> HDX1, HDY1 and HDA2; манго	pH ↓. Уровни сахарозы, фруктозы и глюкозы значительно ↓. Общее содержание органических кислот ↑. Общее содержание полифенолов и антиоксидантная активность значительно ↑	<i>Bao et al., 2021</i>
		<i>Pichia fermentans</i> , <i>Pichia manshurica</i> ; перец чили	pH ↓. Уровень нитритов был ниже, чем в группе с естественной ферментацией. Образцы, ферментированные тремя штаммами, различались по количеству летучих соединений и характерным соединениям ароматических компонентов	<i>Xiao et al., 2023</i>

		<i>Pichia kudriavzevii</i> Z03M; драконий фрукт	рН ↓. Было идентифицировано тридцать девять летучих соединений. Ферментированные вина обладали выраженными фруктовыми, сладкими и медовыми нотками. В группе с инокулированной ферментацией было обнаружено больше типов и количества метаболитов, чем в группе с естественной ферментацией. Максимальное количество жизнеспособных клеток было достигнуто через 4,5 дня	Wang et al., 2024
<i>Rhizopus</i> spp.	Вырабатывает протеазы и амилазы для расщепления белков и полисахаридов. Обладает хорошей устойчивостью к солям и кислотам. Производит некоторые особые ароматические соединения, такие как сложные эфиры и кетоны	<i>Rhizopus oryzae</i> , <i>Aspergillus ibericus</i> ; апельсиновые и банановые корки	Содержание общего белка и липидов значительно ↑. Содержание углеводов и растворимых сахаров значительно ↓. Антиоксидантная активность ↑. Богат клетчаткой и минералами	Araújo et al., 2024
<i>Wickerhamomyces</i> spp.	Хорошая устойчивость к высокой температуре и спирту	<i>Wickerhamomyces anomalus</i> , <i>Candida tropicalis</i> , и <i>Pichia guilliermondii</i> ; <i>Rosa roxburghii</i> Tratt (Поза)	Характеристики летучих ароматов были смодулированы, а ароматические вкусы обогащены и улучшены	Li et al., 2023c
		<i>Wickerhamomyces subpelliculosus</i> DFNb6, <i>Saccharomyces cerevisiae</i> DDNd10, <i>Pichia kudriavzevii</i> DCNa1; кизил	Термоустойчив. dFNb6 обладал самой высокой скоростью самоагрегации. dCNa1 и DFNb6 демонстрировали более высокую плотность клеток биопленки. dFNb6 обладал самой высокой антиоксидантной активностью. Чувствительность к антибиотикам. Изменился состав летучих органических соединений, особенно спиртов и сложных эфиров ↑	Di Cagno et al., 2020

Примечание. ГАМК – гамма-аминомасляная кислота; МКБ – молочнокислые бактерии.

Основные исследования по ферментации с использованием дрожжей в основном посвящены производству вина и напитков. Текущие исследования больше фокусируются на ферментации дрожжей для приготовления вин и напитков, в основном на *Saccharomyces* spp., *Rhizopus* spp., *Aspergillus* spp. и *Pichia* spp. Свойства дрожжей, не относящиеся к *Saccharomyces*, такие как *Torulaspora* spp., представляют интерес для улучшения вкуса и аромата при ферментации вина, пива или хлебного теста. Красная питахайя (драконий фрукт) редко используется в качестве напитка из-за высокого содержания пектина. Jiang et al. (2020) ферментировали вино из красной питахайи путем предварительной обработки пектиназой с последующей инокуляцией *Torulaspora delbrueckii* Biodiva. Ферментированное вино показало увеличение выхода на 16 %, улучшение вкусовых и ароматических профилей (более высокое содержание эфиров и терпенов, более низкое содержание высших спиртов) и увеличение общего содержания фенолов. Однако применение пектиназы также увеличило выработку уксусной кислоты и ухудшило способность дрожжей метаболизировать азотистые соединения. Необходимо учитывать баланс между эффективностью ферментации и вкусовым профилем конечного продукта. T. delbrueckii также значительно увеличил содержание флаванолов нарингина, гесперидина и каротиноидов при спиртовом брожении цитрусовых (ЦФ) (Multari et al., 2021). Qin et al. (2021) установили, что вина, сброженные не-*Saccharomyces* дрожжами с активностью β -глюкозидазы, такими как *Pichia kudriavzevii* F2-24 и *P. kudriavzevii* F2-16, имели более высокие органолептические оценки, чем вина, сброженные дрожжами *Saccharomyces*. Более того, Bi et al. (2024) раскрыли потенциал не-*Saccharomyces* дрожжей в производстве слабоалкогольных ферментированных напитков (СФН) с различными исследовательскими целями. В исследовании использовались 16 штаммов не-*Saccharomyces* дрожжей из 9 видов без добавления сахара для СФН. Большинство СФН содержали больше витамина С и полифенолов по сравнению с не-ферментированными соками. Некоторые штаммы показали превосходную способность к образованию приятного аромата, причем *Wickerhamomyces anomalus* имел повышенную способность к производству витамина В₃ и мономерных фенолов. Что касается *Saccharomyces* spp., он обычно отличается высокой толерантностью к алкоголю и быстрой скоростью брожения и в процессе метаболизма производит в основном этанол и углекислый газ, а также некоторые вторичные метаболиты, такие как глицерин и летучие соединения (Burak, 2025b). Patil et al. (2021) получили вино из сахарного тростника и папайи, ферментированное *Saccharomyces cerevisiae* EC1118, где оптимальное соотношение сока сахарного тростника и папайи составляло 60 : 40. Увеличение количества летучих соединений в ферментированном вине, таких как 1-пентанол, этандойковая кислота и бис(1-метилпропиловый) эфир, оказало положительное влияние на вкус. Ферментированное вино содержало множество минералов и фенольных соединений. Аналогичным образом, яблочный сок, инокулированный 0,2 г/л *S. cerevisiae* WET 136, подавлял рост бактерий, особенно *Leuconostoc pseudomesenteroides*, *Acetobacter malorum*, *Gluconobacter oxydans*, *Gluconobacter cerinus* и *Komagataeibacter saccharivorans*, по сравнению с неинокулированным соком, что привело к снижению содержания винной кислоты, уксусной кислоты, молочной кислоты, этилацетата и этилдеcanoата (Han et al., 2023).

Исследователи уделяют большое внимание разработке и использованию фруктовых выжимок. Благодаря ферментации грибами побочные продукты переработки растительного сырья, такие как фруктовые выжимки, могут быть преобразованы в ценные продукты, включая молочную кислоту и богатые белком корма. Для сырья из выжимок обычно выбирают такие виды предварительных обработок, как тепловая обработка, ферментативное расщепление и кислотное расщепление (Burak et al., 2024). Ajala et al. (2021) использовали гидролизат кожуры ямса, полученный в результате кислотного гидролиза с H₂SO₄ и имеющий высокое содержание редуцирующих сахаров (глюкозу, ксилозу, рибозу и другие). Для ферментации гидролизата использовали *Rhizopus oryzae*, что способствовало высокой чистоте и выходу молочной кислоты из-за улучшенного массопереноса и пониженной вязкости. Необходимо отметить, что при использовании пищевых отходов для производства молочной кислоты гриб *R. oryzae* устойчив к высокой концентрации молочной кислоты лучше, чем обычно употребляемые бактериальные продуценты, также берутся среды с гораздо более низкими концентрациями питательных веществ, чем те, которые требуются бактериям (Ajala et al., 2021). Ibarruri et al. (2021) использовали *Rhizopus* spp. для твердой и жидкой ферментации фруктовых и овощных отходов, что значительно увеличило содержание белка и долю незаменимых аминокислот. Причем доля мононенасыщенных жирных кислот увеличилась, тогда как доля полиненасыщенных жирных кислот снизилась после ферментации. Более того, в ферментированных выжимках была увеличена концентрация фенольных соединений и антиоксидантная активность. Результаты исследования подтвердили, что сочетание твердой и жидкой ферментации является эффективным способом преобразования фруктовых и овощных отходов в альтернативный кормовой ингредиент с высоким содержанием белка, сбалансированным жирно-кислотным и аминокислотным составом (Ibarruri et al., 2021). Использование твердых частиц отходов непосредственно для ферментации исключает этап предварительной обработки и упрощает промышленную переработку. Апельсиновые и виноградные отходы измельчали и инокулировали *Aspergillus niger* CBMAI 2084 для твердофазной ферментации без добавления воды. Ферментированные отходы имели более высокое содержание золы (≤ 49 %), сырого протеина (около 40 %) и растворимой и нерастворимой клетчатки (≤ 51 %), чем неферментированные отходы, что могло способствовать росту

и выработке ферментов грибами в субстрате. Среди них ферментированные апельсиновые отходы имели высокую активность фитазы и липазы, а ферментированные виноградные отходы имели высокую активность протеазы, что может быть использовано в качестве источника выработки ферментов (Camargo et al., 2022). Более того, Alkalbani et al. (2024) использовали *Pichia cecembensis* и *P. kudriavzevii* для приготовления ферментированных отходов финикового сиропа (ФФС). Результаты показали, что ФФС обладал значительным ингибирующим действием на α -амилазу и противоопухолевым потенциалом, о чем свидетельствует значительная цитотоксичность в отношении линий раковых клеток Caco2 и MCF-7.

Проводимые исследования показывают, что процесс ферментации может снизить нагрузку на окружающую среду, уменьшить количество захоронений и сжигания фруктовых выжимок. Однако при работе с большими количествами выжимок нельзя не учитывать потребление энергии и утилизацию отходов в процессе ферментации, также выжимки могут содержать антипитательные факторы, такие как танины, количество которых необходимо снизить в процессе ферментации.

1.3. Изменение микробного разнообразия в ферментированных продуктах

Присутствие микроорганизмов в ферментированных продуктах может дать двоякий результат. Токсины, продуцируемые некоторыми грибами, такими как афлатоксин, охратоксин и патулин, могут загрязнять фрукты и овощи, а их длительное употребление – увеличить риск заболеваний (Küçük et al., 2023; Meira et al., 2024; Turna et al., 2023). Также широко изучалась эффективность микроорганизмов, способных к детоксикации микотоксинов (Cheng et al., 2023; Peng et al., 2023). Хотя для ферментированных овощей максимальное содержание биогенных аминов (БА) неограниченно, для максимальной эффективности процесса и для мониторинга и оптимизации условий микробной ферментации были проведены исследования количественной оценки содержания биогенных аминов в ферментированных овощах (Jastrzebska et al., 2023; Rózsanska et al., 2022; Zhao et al., 2021c). Кроме того, несоблюдение санитарных правил и норм в процессе ферментации может способствовать росту во фруктах и овощах вредных бактерий, таких как *Salmonella* spp., что может представлять угрозу для здоровья человека (Lee et al., 2021). Поэтому проводились исследования по изучению микробных систем ферментации, которые подавляют токсичные бактерии (Balyan et al., 2024; Van Beeck et al., 2020). Следует отметить, что хотя большинство бактерий безвредны (например, *Bacillus* spp.), существуют некоторые виды, которые могут быть патогенными для человека и животных, например, *Bacillus cereus*, который может вызывать пищевое отравление (Shiota et al., 2010). Поэтому перед использованием этих микроорганизмов в целях пищевой ферментации необходимо убедиться в безопасности используемых штаммов и надлежащей оценке риска. В целом, микроорганизмы играют важную роль в процессе ферментации, и рациональное использование технологии микробной ферментации может обеспечить человека питательной и здоровой пищей. Однако необходимо контролировать процесс ферментации, чтобы избежать образования вредных веществ.

Микробные сообщества напрямую влияют на вкусовой профиль ферментированных фруктов и овощей. Анализируя микробный состав, можно выявить механизм специфических вкусовых соединений, чтобы оптимизировать условия ферментации для получения желаемого вкуса. Поддержание разнообразия и стабильности микробных сообществ является центральной задачей в производстве ферментированных фруктов и овощей, на которое влияют факторы окружающей среды и выбор сырья (Burak, 2025b). Выявление микроорганизмов, которые играют доминирующую роль в процессе ферментации, таких как молочнокислые бактерии и дрожжи, и изучение их метаболических путей находятся в центре исследований. Метаболическую активность *L. plantarum* рода молочнокислых бактерий можно в целом разделить на три метаболических пути, которые влияют на вкус фруктовых продуктов: метаболизм сахара, метаболизм белка и метаболизм липидов. *L. plantarum*, потребляя восстанавливающие сахара во фруктах, производит компоненты вкуса, такие как летучие вещества и органические кислоты; таким образом, эти сахара участвуют в метаболизме сахара *L. plantarum* (Burak, 2025a).

Ферментация фруктовых продуктов с помощью МКБ не только приводит к более насыщенным ароматам, но и маскирует или уменьшает некоторые посторонние привкусы. *L. plantarum* NCU116 усиливал аромат сока манго, увеличивая содержание спирта, который является основным ароматическим соединением в соке манго (Burak, 2025a; Liu et al., 2023a). Это означает, что контроль микробных сообществ в системе ферментации является ключом к качеству вкуса ферментированных фруктов и овощей. Самое главное, необходимо изучить взаимосвязь между составом микробного сообщества и сенсорными свойствами, пищевой ценностью и сроком годности ферментированных фруктов и овощей. Для анализа корреляции и причинно-следственной связи между микробными сообществами и характеристиками продукта использовали статистические и биоинформатические методы. Wang et al. (2022a) установили, что бактерии (включая *Lactiplantibacillus*, *Halanaerobium* и *Halomonas*) оказывают большее влияние на вкус ферментированных продуктов, чем грибы (например, *Debaryomyces hansenii*). Среди них, *Halanaerobium* и *Halomonas* были положительно коррелированы с образованием ключевых вкусовых соединений, таких как масляная кислота, гексановая кислота и 4-этилфенол в паокаи, тогда как *Enterobacteriaceae* отрицательно коррелировали с этими вкусовыми соединениями. Salas-Millan et al. (2022) обнаружили, что содержание *Lactobacillus* в ферментированном стебле брокколи оставалось стабильным после 6 дней хранения в холодильнике при

4 °C, что указывает на хороший срок годности ферментированного продукта. Присутствие молочнокислых бактерий, в частности *Latilactobacillus sakei*, оказало положительное влияние на иммуномодулирующие и метаболические преимущества продукта, что может положительно сказаться на продлении срока годности. Наконец, крайне важно исследовать, как микробные сообщества можно модулировать, регулируя условия обработки или используя другие средства (Salas-Millan et al., 2022). При проведении анализов для более глубокого понимания состава и функций микробных сообществ можно использовать современные методы молекулярной биологии, такие как секвенирование гена 16S рРНК, макрогеномика и макротранскриптомика.

Таким образом, изучение формирования и механизмов регуляции микробных сообществ имеет ключевое значение для повышения качества и безопасности продукции. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на применении микробного разнообразия и современных биотехнологий в микробной регуляции для содействия развитию индустрии ферментированных фруктов и овощей.

2. Изменение биологически активных соединений в процессе ферментации

Биоактивные соединения, такие как фенолы и полифенольные соединения, витамины, минеральные вещества в процессе ферментации фруктов и овощей подвержены значительным изменениям. Эти изменения обусловлены главным образом микробной метаболической активностью, действием эндогенных или экзогенных ферментов во фруктах и овощах, условиями ферментации (например, твердофазная ферментация, предварительная обработка сырья, образование кислоты для снижения pH системы) и взаимодействием между микроорганизмами (Burak, 2025a).

2.1. Гидролиз фенолов

Фенольные соединения во фруктах и овощах можно разделить на растворимые (извлекаемые или свободные), связанные формы (связанные с компонентами клеточной стенки растений) и нерастворимые связанные формы (прикрепленные к структурным компонентам клеточной стенки). Полифенолы в основном включают соединения фенольных кислот и флавоноиды, из которых флавоноиды представляют собой большую группу соединений в растительном мире, включая флавоноиды, флавонолы, изофлавоноиды и антоцианы (Burak, 2025b; Küçükğöz et al., 2023). Увеличение содержания полифенолов положительно влияет на антиоксидантную активность, цвет и вкус ферментированных фруктов и овощей. Ферменты (эндогенные или экзогенные), такие как полифенолоксидаза (ПФО), танназа, декарбоксилаза фенольной кислоты и гликозидаза, во время ферментации высвобождают связанные фенольные соединения. Li et al. (2020) установили, что оптимальными фенольными субстратами ПФО в корне лотоса, ферментированном *L. plantarum* LH-B02, были хлорогеновая кислота, галловая кислота и катехин. LH-B02 активно рос во время ферментации и смог преобразовать 84,17 % катехина, 90,75 % хлорогеновой кислоты и 91,07 % галловой кислоты в течение 30 ч, что еще больше замедлило окислительное потемнение. В смузи из черники и арбуза, ферментированных с использованием *L. plantarum* LpAv и 73a, общее содержание фенолов и антоцианов составило 0,68–0,73 мг/г и 0,16–0,17 мг/г соответственно, что обусловлено высокой активностью *L. plantarum* LpAv и 73a, обладающих высокой активностью ферментов, например, β-галактозидазы и β-глюкозидазы (Méndez-Galarraga et al., 2023). Аналогичным образом, ферментация с использованием *L. fermentum* 252 значительно ($p < 0,05$) оказала влияние на увеличение общего содержания жирных кислот (ОЖК) в цитрусовом соке и способствовала образованию фенилмолочной кислоты. *L. fermentum* 252 способствовал значительному увеличению содержания флавоноидов и флавонолов, таких как нарингенин-7-глюкозид, гесперидин и номилин, посредством гидролиза (Xu et al., 2023). Чтобы подавить потемнение кожуры провели опрыскивание плодов личи штаммом *P. pentosaceus* SSC12 в виде мелкодисперсного тумана, что привело к снижению активности ПФО, пероксидазы в образцах. Кроме того, штамм SSC12 повышал активность фенилаланиндезаминазы и активность генов, связанных с биосинтезом антоциана и транспортерами, одновременно снижая активность генов, связанных с деградацией антоциана, что улучшало стабильность антоциана (Shen et al., 2024). Помимо ферментативных реакций, микробный метаболизм также может преобразовывать некоторые нерастворимые фенолы в более растворимые формы посредством метилирования, карбоксилирования, сульфатирования, гидроксирования и окисления, например, превращая фенолы в их гликозидные формы (Gulsunoglu-Konuskan et al., 2022). Инокуляция сока яблок сорта Фуджи 1 % *Limosilactobacillus reuteri* CTCF-L3 значительно увеличила содержание галловой кислоты и протокатеховой кислоты, что было связано с преобразованием ризофорина и эпикатехина *L. reuteri*. Между тем, содержание кофейной кислоты, которая обладает антимикробной активностью и повышает стабильность сока, было значительно повышено после 12 ч ферментации (Ji et al., 2023). В присутствии гликозидазы кверцетин-3-О-глюкозид может гидролизиться до кверцетина и глюкозы. Соки капусты кале (кудрявая капуста), ферментированные с *L. reuteri* EFEL6901 или *L. fermentum* EFEL6800, показали значительное увеличение содержания кверцетина и кемпферола и высокий уровень антиоксидантной и противовоспалительной активности (Kim et al., 2023). Изменения в среде ферментации, такие как образование органических кислот, которые снижают pH системы, или температура ферментации, также могут влиять на изменения фенольных соединений. De Oliveira et al. (2020) ферментировали плоды ацеролы и гуавы в смешанном ферментере с *Lactobacillus* spp. Результаты показали, что снижение содержания

растворимых сухих веществ и pH сопровождалось увеличением TFC и общего количества фенолов, а также увеличением антиоксидантной активности. В мякоти мангабы, ферментированной с *L. casei* 01, установлен более низкий pH и более высокие концентрации биодоступных фенолов во время хранения, чем в неферментированной мякоти (*de Assis et al.*, 2024). Кроме того, полифенольные компоненты фруктов и овощей, такие как гидроксикоричная кислота, дигидрохалкон, флавонолы и антоцианы, оказывают важное влияние на вкус и пищевую ценность. В частности, гидроксикоричная кислота в форме эфира является распространенным фенолом в этих продуктах питания (*da Silva et al.*, 2023a).

Содержание флавоноидов оказывает значительное влияние на вкус продукта (*Chiorcea-Paquim*, 2023). Пробиотическая ферментация увеличивает содержание растворимых фенолов и флавоноидов. Ферментация с помощью *L. fermentum* 252 значительно ($p < 0,05$) увеличила содержание TFC в цитрусовом соке и способствовала образованию фенилмолочной кислоты. *L. fermentum* 252 способствовала значительному увеличению флавоноидов и флавонолов, таких как нарингенин-7-глюкозид, гесперидин и номилин, посредством гидролиза (*Xu et al.*, 2023). Инокуляция яблочного сока сорта Фуджи 1 % *L. reuteri* CTCF-L3 значительно увеличила содержание галловой и протокатеховой кислот, что объясняется преобразованием ризофорина и эпикатехина *L. reuteri*. При этом содержание кофейной кислоты, обладающей антимикробной активностью и повышающей стабильность сока, значительно возросло после 12 ч ферментации (*Ji et al.*, 2023). Микробная ферментация способствует увеличению концентрации фенольных соединений, тем самым усиливая их антиоксидантную активность. В яблочных выжимках, ферментированных грибами (*Actinomicor elegans* ATCC-22963 и *Umbelopsis isabellina* ATCC-36671), значительно увеличивалось в начале ферментации количество многих веществ, включая хлорогеновую кислоту, гиперозид, изокверцитрин, рутин, кверцитрин и флоридзин, вероятно, из-за способности целлюлазы, лигниназы и пектиназы гидролизовать эфирные или сложнотэфирные связи между компонентами растительной клеточной стенки и фенолами, высвобождая таким образом большие количества свободных фенольных соединений (*Dulf et al.*, 2023). Однако жидкостная ферментация обычно имеет более быструю кинетику ферментации в среде, которая благоприятствует переносу питательных веществ и метаболитов. Это может привести к быстрому преобразованию фенольных соединений. *Ramires et al.* (2024) использовали *S. cerevisiae* для ферментации целых плодов и мякоти плодов земляничного дерева. Липазная и эстеразная активность обоих образцов значительно возросла в процессе ферментации, тогда как активность ксиланазы снизилась. Кроме того, увеличилось общее содержание фенолов, содержание ТФК и общее содержание антоцианов. Эффективность экстракции полифенолов также значительно повысилась, особенно для таких соединений, как галловая кислота, эллаговая кислота и гликозиды кверцетина.

Микробная ферментация не только высвобождает и преобразует существующие фенольные соединения, но и потенциально способна производить новые фенольные соединения посредством вторичных метаболических путей микроорганизмов (*Burak*, 2022). В заключение следует отметить, что микробная ферментация является эффективным методом увеличения содержания фенольных соединений из фруктов, овощей и отходов и может быть источником новых природных антиоксидантов и других ресурсов для пищевой промышленности.

2.2. Биогенные амины, витамины и минеральные вещества

Биогенные амины (БА) – это азотистые соединения, продуцируемые микроорганизмами и катализируемые декарбоксилазами аминокислот. БА полезны в умеренных количествах, а в избыточных могут нанести вред. Ферментированные продукты с высоким содержанием биогенных аминов могут вызывать аллергические реакции, такие как респираторный дистресс, рвота и лихорадка (*Zhang et al.*, 2021). *Świder et al.* (2020) обнаружили, что среди ферментированных овощей брюссельская капуста и брокколи имеют самый высокий риск для здоровья (индекс биогенных аминов более 400 мг/кг). Среди них концентрации путресцина и тирамина были особенно высоки в ферментированной брюссельской капусте, а брокколи также демонстрировали высокий уровень кадаверина. Это может быть связано с высоким содержанием в них свободных аминокислот, которые обеспечивают потенциал для образования большого количества БА. Уровень свободных аминокислот в ферментированном чесноке достигал $3\,917,42 \pm 1\,528,73$ мг/кг, что подразумевает риск образования чрезмерного количества БА.

Контроль уровня биогенных аминов в ферментированных фруктах и овощах важен для безопасности пищевых продуктов и здоровья потребителей. Сравнивая повторно используемый рассол с уменьшенным количеством микроорганизмов и пресный солевой рассол *Zhao et al.* (2021b) определили, что капуста кимчи, ферментированная в повторно используемом рассоле (ПР), имела самое высокое содержание азота-предшественника аминокислоты и самые низкие уровни нитрита (1,10 мг/кг), гистамина (0,29 мг/кг), тирамина (0,79 мг/кг) и путресцина (ниже предела обнаружения). Это указывает на то, что кимчи, ферментированная в ПР, эффективно подавляла накопление БА и нитритов, вероятно, потому, что ПР содержит исходные микроорганизмы (молочнокислые бактерии и дрожжи), которые растут и формируют стабильные микробные сообщества при повторном использовании, дополнительно генерируя полезные метаболиты и подавляя вредные микроорганизмы. Кроме того, подкисление свежего рассола устраняло путресцин из кимчи и снижало содержание гистамина на 33,93 % (*Zhao et al.*, 2021b).

Недавно были установлены значительные различия в содержании биогенных аминов в смешанных овощных соках, полученных путем ферментации различных органических овощей. Среди них ферментированный огуречный сок имел самое высокое содержание биогенных аминов (116,52 мг/л), тогда как томатный сок – самое низкое (6,36 мг/л). Доли гистамина, тирамина, путресцина и кадаверина различались в разных овощных соках: с самыми низкими долями (0,44 %) гистамина и тирамина в ферментированном соке краснокочанной капусты и самыми высокими (68 %) в ферментированном соке брокколи. Это может быть связано с сырьем и типами микроорганизмов, участвующих в процессе ферментации (*Jastrzebska et al.*, 2023). БА могут представлять риск для здоровья для определенных групп населения (например, пациентов, принимающих ингибиторы моноаминоксидазы). Таким образом, мониторинг содержания БА в ферментированных овощных соках (ФОС) имеет важное значение для защиты здоровья потребителей и безопасности пищевых продуктов.

Витамины необходимы для здоровья человека и подразделяются на водорастворимые (например, витамин С) и жирорастворимые (например, витамины А, D и Е) (*Burak*, 2024; *Fan et al.*, 2023). Организм человека не способен синтезировать большинство необходимых витаминов. Поэтому увеличение их потребления с пищей является приоритетной задачей исследований. Показано, что микробная ферментация оказывает значительное влияние на увеличение биодоступности витаминов во фруктах и овощах. Витамин С, также известный как аскорбиновая кислота, является водорастворимым витамином. Витамин С обладает антиоксидантными свойствами, но склонен к деградации при хранении и переработке из-за плохой стабильности (*Burak*, 2025b; *Burak* 2025a; *Li et al.*, 2023a). Ферментированный сок манго, предварительно обработанный ультразвуком и ультрафиолетовым излучением (УЗ-УФ), улучшил стабильность и биодоступность каротиноидов и витамина С, хотя количество растворимых пищевых волокон было снижено, а его антиоксидантные свойства были выше, чем у свежего сока манго, особенно после 30 дней хранения в холодильнике (*Wang et al.*, 2021b). Аналогичным образом *Cai et al.* (2022) ферментировали сок киви с добавлением сахарозы и установили, что *L. plantarum* LG1034 и *Pediococcus lactis* LG0259 в большей степени способствовали стабилизации витамина С в кислой среде, тогда как группа с дрожжевой ферментацией ускорила деградацию витамина С. Кроме того, *Xu et al.* (2023) исследовали инокулированный цитрусовый сок с *LAB* и установили, что содержание витамина С в ферментированном соке изначально ниже, а затем происходит увеличение в течение 96 ч, при этом *L. brevis* 182 и *Lacticaseibacillus paracasei* 502 сохранили значительное количество аскорбиновой кислоты (более 300 мг/л), тогда как *L. fermentum* 252 показал непрерывное снижение содержания витамина С во время ферментации. Эти результаты свидетельствуют о том, что характеристики различных штаммов оказывают существенное влияние на выработку и стабильность витамина. Однако ферментационная обработка определенных штаммов может замедлить потерю витамина С. Микробная ферментация может положительно влиять на содержание минеральных веществ во фруктах и овощах, повышая их пищевую ценность и биодоступность, тем самым положительно влияя на здоровье человека и потребление питательных веществ (*Burak*, 2025b).

Процесс ферментации не только помогает продлить срок годности и улучшить сенсорные свойства фруктов, но и повышает их ценность как функционального продукта питания, например, обеспечивая необходимым селеном (Se). Se является важным микроэлементом, дрожжи (*L. brevis* CRL2051 и *F. Tropaeoli* CRL2034) преобразуют неорганический Se в органическую форму и накапливают ее (*Burak*, 2025a). Ферментация маракуйи и манго с добавлением Na_2SeO_3 показала значительное увеличение концентрации Se. Процесс дрожжевой ферментации потребляет углеводы и преобразует Se в наночастицы селена и селеноаминокислоты, влияя при этом на выработку молочной кислоты, уксусной кислоты и маннита. *F. Tropaeoli* CRL2034 увеличил выработку маннита, что способствует снижению сахара в соке и образованию низкокалорийного подсластителя (*Crespo et al.*, 2021).

2.3. Деградация антипитательных факторов

Антипитательные факторы (АПФ) – это вредные вещества, которые мешают усвоению питательных веществ и снижают биодоступность. Процесс ферментации снижает или устраняет антипитательные факторы, присутствующие во фруктах и овощах, такие как фитиновая кислота и танины, что способствует пищеварению и усвоению питательных веществ, а также придает фруктам и овощам антиоксидантные, противовоспалительные и другие полезные для здоровья свойства (*Burak*, 2025b).

Фитиновая кислота – это природное соединение, содержащееся в семенах и листьях растений, которое связывает минералы, такие как железо, цинк и кальций, тем самым снижая биодоступность этих минералов (*Wang et al.*, 2021a). В ходе исследования замачивали листья *Cucurbita* sp. в 3 % сахарозы и 3 % NaCl для анаэробной ферментации. Снижение содержания фитиновой кислоты в ферментированных листьях может быть связано с метаболизмом молочнокислых бактерий, особенно *Lactobacillaceae*, для производства ферментов (например, фитазы), которые могут расщеплять фитиновую кислоту, а также с выработкой молочной кислоты для снижения pH окружающей среды и активации активности фитазы (*Misci et al.*, 2021). Ферментационные обработки также уменьшили количество патогенов, таких как *E. coli* и *Enterococcaceae*, что может способствовать снижению риска желудочно-кишечных заболеваний. Распад фитиновой кислоты высвобождает связанные минералы, которые облегчают ее усвоение организмом.

Аналогичным образом, содержание фитиновой кислоты в листьях *Amaranthus* sp., естественным образом ферментированных в 3 % сахарозы и 3 % NaCl, претерпело схожие изменения. Бактерии *Lactobacillaceae* также доминировали на поздних стадиях ферментации. Обработка ферментацией значительно увеличила содержание тиамина (витамина B1), рибофлавина (витамина B2), витамина B6, β -каротина и лютеина в листьях, что увеличило пищевую ценность ферментированных листьев (*Misci et al.*, 2022).

К антипитательным факторам также относятся танины, которые представляют собой класс полифенольных соединений в растениях с сильным вяжущим вкусом и способностью связываться с белками и пищеварительными ферментами, влияя на переваривание и усвоение белков (*Burak, 2024a; Wu et al.*, 2022). Во время ферментации танины могут разрушаться, тем самым уменьшая их воздействие на белки и другие питательные вещества. *Akter et al.* (2022) добавили в гранатовый сок ацилгидролазу танина (ТАН) в процессе ферментации для преобразования гидролизуемых танинов в эллаговую кислоту, фенольное соединение с антиоксидантной и противовоспалительной активностью. Ферментированный гранатовый сок *L. vespulae* DCY75 с добавлением ТАН содержал до 70 % эллаговой кислоты, обладал большим количеством общего содержания фенолов и более высокой антиоксидантной активностью. Ферментированный сок граната также увеличивал пролиферацию клеток в линии клеток рака молочной железы (MCF-7) и повышал экспрессию генов – факторов регуляции эстрогена, таких как рецептор эстрогена альфа, рецептор эстрогена бета и pS2. Более того, PG-F обладал противовоспалительной эффективностью, что было продемонстрировано его способностью ингибировать выработку NO и снижать экспрессию основного провоспалительного цитокина iNOS в клетках RAW 264.7 (*Akter et al.*, 2022). Ферментированные фрукты и овощи ориентированы на преобразование антипитательных факторов, улучшают пищеварение и всасывание, одновременно обладая антиоксидантной, противовоспалительной активностью и другими преимуществами для благотворного влияния на организм.

Технология микробной ферментации не только снижает концентрацию природных антипитательных факторов, но и уменьшает остатки пестицидов во фруктах и овощах, тем самым повышая их пищевую ценность и безопасность. Остатки пестицидов во фруктах и овощах также представляют угрозу для здоровья человека. Исследования показали, что микробная ферментация фруктов и овощей может в определенной степени снизить остатки пестицидов, например, посредством микробной адсорбции и деградации (*Burak, 2025b; Azam et al.*, 2020). Карбендазим – это бензимидазольный фунгицид широкого спектра действия, обычно встречающийся в коровьем горохе. В ходе исследования установлено, что во время естественной ферментации маринованного коровьего гороха константа скорости деградации карбендазима составляла 0,9945 с периодом полураспада $14,06 \pm 0,82$ дня (*Jin et al.*, 2023). Примечательно, что микроорганизмы (например, *Lactobacillus*) в маринованном коровьем горохе преобразуют карбендазим в метаболиты, такие как TP188, TP222 и TP211 (TP), и хотя остатки исходных опасных веществ были снижены, некоторые TP показали более высокую токсичность для развития и мутагенность, чем карбендазим, особенно TP134, что представляет риск для здоровья потребителя.

Хотя микробная ферментация может в определенной степени снизить остатки пестицидов, она не устраняет полностью риск их присутствия. Поэтому в сельскохозяйственном производстве следует принимать комплексные меры, включая рациональное использование пестицидов, использование методов биологического контроля и физическую и химическую обработку, чтобы обеспечить безопасность фруктов и овощей. Кроме того, потребители также должны минимизировать попадание в организм остатков пестицидов с фруктами и овощами путем тщательной мойки и надлежащих методов обработки.

3. Влияние ферментированного плодоовощного сырья на здоровье

Ферментированные фрукты и овощи, содержащие многие питательные вещества, обладают множеством полезных для здоровья свойств. Они защищают клетки от повреждения свободными радикалами, усиливая антиоксидантную активность. Более того, ферментированные фрукты и овощи обладают противовоспалительными свойствами, помогая уменьшить воспалительные реакции в организме, а также помогают контролировать вес и бороться с ожирением. Ферментированные фрукты и овощи действуют как антимикробные средства, подавляя рост вредных бактерий и помогая снизить кровяное давление, уровень сахара в крови, тем самым поддерживая здоровье сердечно-сосудистой системы и баланс сахара в крови.

3.1. Антиоксидантная активность и противовоспалительные свойства ферментированных фруктов и овощей

Поддержание баланса свободных радикалов и антиоксидантной способности в организме имеет решающее значение, поскольку избыток свободных радикалов может вызвать воспаление, повреждение ДНК и нарушение липидного обмена, что приводит к повреждению клеток. Свободные радикалы – это молекулы с неспаренными электронами, которые стремятся обрести стабильность, отнимая электроны у других молекул, что приводит к окислительному стрессу. Антиоксиданты способны отдавать электроны свободным радикалам, нейтрализуя их реакционную способность и таким образом защищая клетки от повреждения (*Liu et al.*, 2024). Биоактивные ингредиенты в ферментированных фруктах и овощах

положительно влияют на антиоксидантную систему организма, усиливая общую антиоксидантную активность посредством различных механизмов, таких как увеличение содержания антиоксидантных соединений, усиление активности антиоксидантных ферментов, смягчение перекисного окисления липидов и регуляция сигнального пути (Liu et al., 2024; Girotto et al., 2024; Pi et al., 2023).

Фенольные соединения являются одними из важных антиоксидантных веществ во фруктах и овощах, включая флавоноиды, танины и антоцианы, которые широко встречаются в различных фруктах и овощах и могут повышать их биодоступность и активность во время ферментации (Burak, 2025b; Burak, 2023). Zhao et al. (2021a) установили, что ферментированный сок сельдерея увеличивает содержание активных компонентов, таких как общее количество полифенолов, флавоноидов, витамина С и супероксиддисмутазы (СОД), и помогает снизить окислительный стресс, вызванный диетой с высоким содержанием жиров. Аналогичным образом, общее содержание полифенолов, СОД и витамина С в экстрактах киви, ферментированных *L. paracasei* LG0260, было выше, чем в группе образцов с естественной ферментацией, что говорит о том, что содержание антиоксидантных соединений положительно коррелирует с активностью антиоксидантных ферментов (Cai et al., 2022). В пастеризованных мякоти сметанного яблока и мякоти маракуйи в результате ферментации штаммами дрожжей (*S. cerevisiae* subsp. *boulardii* CNCM I-745 и *Saccharomyces bayanus* *Safceder* AB-1) наблюдалось увеличение содержания полифенолов, спиртов и ненасыщенных жирных кислот, что коррелировало с повышенной активностью удаления свободных радикалов ABTS и FRAP. Кроме того, ферментированные образцы проявили улучшенные противовоспалительные свойства, включая антигемолитическую активность и способность предотвращать денатурацию белка (Martínez-Mendoza et al., 2023). Tang et al. (2023) получили ферментированные соки с высоким общим содержанием фенола и TFC и их высокой активностью по удалению радикалов DPPH и ABTS, а также способность восстанавливать Fe^{3+} путем ферментации яблок и дыни с использованием *Lactobacillus acidophilus* и дрожжей. Кроме того, они установили, что 6,25 % ферментированного сока может продлить жизнь *Caenorhabditis elegans*, повысить активность СОД и глутатионпероксидазы (GSH-Px), снизить содержание малонового диальдегида (МДА – продукт перекисного окисления липидов), что свидетельствует о значительной устойчивости к стрессу без ущерба для роста, размножения и передвижения *C. elegans* (Tang et al., 2023).

Когда клетки подвергаются окислительному стрессу или другим сигналам активации, Nrf2 диссоциирует от связанного Keap1 (Kelch – подобный ECH-ассоциированный белок 1) и переносится в ядро, что, в свою очередь, стимулирует экспрессию ряда антиоксидантных генов, таких как SOD, GSH-Px, глутатион-S-трансфераза и каталаза (CAT), тем самым способствуя удалению активных форм кислорода (ROS). Более того, NF-κB p65 (субъединица p65 ядерного фактора каппа – легкой цепи активированных В-клеток) в первую очередь связан с воспалением и иммунными реакциями, вызывая экспрессию антиоксидантных ферментов и других защитных молекул, чтобы помочь клеткам справиться с окислительным повреждением (Ishii et al., 2022; Mota et al., 2023). Cheng et al. (2022) инокулировали черничные выжимки *L. casei* (CICC 20280) для получения ферментированной жидкости. По сравнению с контрольной группой в ферментированном образце общая антиоксидантная активность (Т-АОС), CAT и активность SOD были увеличены, а уровни MDA снижены. В ходе исследований установлено, что обилие полезной кишечной микробиоты у мышей увеличивалось после кормления ферментированными черничными выжимками. Кроме того, фосфорилирование MAPK p38, NF-κB p65 и легкой цепи миозина (MLCK) и активация киназы легкой цепи миозина (MLCK) были значительно снижены, причем MLC и MLCK были связаны с сокращением гладких мышц сосудов, что может влиять на воспалительную реакцию (Cheng et al., 2022). Аналогичным образом Chai et al. (2024) обнаружили, что у мышей, получавших ферментированный жмых черники, улучшилась активность антиоксидантных ферментов, снизилось перекисное окисление липидов и значительно снизились концентрации воспалительных факторов некроза опухоли-альфа (TNF-α), интерлейкина-1 бета (IL-1β) и интерлейкина-6 (IL-6) на HFD.

Результаты исследования показали смягчающее действие ферментированных выжимок на окислительный стресс и воспаление, вызванные HFD (Chai et al., 2024). Уровни Т-АОС и MDA отражают антиоксидантный статус организма, при этом повышенный уровень MDA указывает на повреждение биоупленки и окислительную атаку на клетки (Dong et al., 2022; Shuai et al., 2023). Инокуляция *L. plantarum* HU-C2 W к соку личи и ферментированному в течение 40 ч, а затем скормливаемому мышам C57BL/6J в течение 8 недель, показал повышенную активность печеночной Т-АОС и сниженные уровни MDA, что указывает на то, что ферментированный сок личи (ФСЛ) усиливает антиоксидантную способность печени и ослабляет повреждение биоупленки (Wang et al., 2023). Ферментация сока облепихи смешанными штаммами эффективно снижает генерацию ROS, вызванную H_2O_2 , и снижает содержание MDA, тем самым усиливая антиоксидантную защитную способность клеток C2C12 (модель клеток миотубов мышей), обычно используемой линии клеток скелетных мышц у мышей, увеличивая активность SOD, CAT и GSH-Px и ослабляя окислительное повреждение (Liu et al., 2023b).

Несмотря на многочисленные исследования антиоксидантных свойств ферментированных фруктов и овощей, экспрессия и активность биологически активных соединений и антиоксидантных ферментов

в различных моделях заболеваний и то, как они реагируют на различные антиоксидантные стимулы, должны быть дополнительно изучены. Кроме того, необходима дальнейшая идентификация и валидация новых биомаркеров окислительного стресса, таких как карбонилирование белков и AGE, для оценки степени окислительного стресса и повреждения клеток. Иммунитет – это защитный механизм организма, и его улучшение помогает блокировать вирусную инвазию и снизить заболеваемость. Иммунные клетки – это клетки, участвующие в иммунном ответе или связанные с ним, которые секретируют цитокины для борьбы с патогенами и вирус-индуцированными инфекционными агентами, включая ИЛ, ФНО-α и моноцитарный хемоаттрактантный белок-1 (МХБ-1) (Surai et al., 2024). Исследования показали, что ферментированные фрукты и овощи оказывают свое противовоспалительное действие, главным образом, за счет увеличения содержания противовоспалительных соединений, модуляции воспалительных цитокинов, ингибирования продукции медиаторов воспаления и подавления сигнальных путей (Surai et al., 2024). В умеренных количествах воспалительные факторы, такие как оксид азота (NO), интерлейкины, TNF-α и интерферон гамма, помогают бороться с инфекцией и способствуют заживлению, но при избытке возникают воспалительные заболевания, поэтому важно поддерживать их баланс (Zeinali et al., 2017). По сравнению с контрольной группой, ферментированные черничные выжимки снизили относительную экспрессию TNF-α, IL-1β, IL-6 и интерлейкина-8. Уровни MAPK p38, NF-κB p65 и MLC в группе FBP также были снижены (Cheng et al., 2022). Циклооксигеназа-2 (COX-2) – это фермент, который быстро экспрессируется моноцитами-макрофагами и фибробластами после стимуляции организма воспалительными факторами, известен как индуцируемый фермент, который является одним из ключевых ферментов, вызывающих воспалительные реакции (Karim et al., 2023). Ингибирование продукции COX-2 в экстрактах кожуры ананаса, ферментированных *L. plantarum* 299v (DSMZ 9843) и *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG (ATCC 7469), может быть связано с увеличением содержания феруловой кислоты, которая в высоких концентрациях ингибирует COX-2 и смягчает вызванное острым повреждение почек у мышей (Mir et al., 2018). Противовоспалительные процессы могут снижать продукцию воспалительных медиаторов путем ингибирования активации MAPK p38 и NF-κB p65. Среди них в ядре NF-κB p65 может соединяться с промоторными областями генов, связанных с воспалением, и способствовать экспрессии воспалительных цитокинов и ферментов, таких как TNF-α, IL-1β, IL-6, COX-2 и iNOS (Zhu et al., 2018). Yun et al., (2022) приготовили ферментированный продукт, инокулируя пробиотики в смешанный овощной сок. Обнаружено, что FVJ дозозависимо ослабляет воспалительную реакцию, вызванную бактериальным токсином липополисахаридом (ЛПС), в клетках RAW264.7 и снижает уровни АЛТ (аланинаминотрансфераза) и АСТ (аспартатаминотрансфераза) в сыворотке у мышей с колитом, вызванным декстрансульфатом натрия, улучшая длину толстой кишки и повреждение тканей (Yun et al., 2022). Ферментированный сок также ингибировал экспрессию mPHK iNOS, COX-2 и NF-κB, что позволяет предположить, что его противовоспалительное действие может осуществляться через NF-κB, обладающий иммуномодулирующим потенциалом.

Кроме того, известно, что фенолы в ферментированных фруктах и овощах уменьшают воспаление и улучшают иммунитет (Mir et al., 2018). В дополнение к фенольным соединениям ферментация фруктов и овощей приводит к образованию пептидов, которые образуют водородные связи и гидрофобные взаимодействия с iNOS, тем самым способствуя противовоспалительной активности. Брокколи, ферментированные двумя видами *Lactobacillus* (*L. plantarum* A3 и *L. rhamnosus* ATCC7469), обладали 17 противовоспалительными пептидами, среди которых пептид SIWYGPDPR обладал самой сильной способностью ингибировать высвобождение NO из воспалительных клеток при концентрации 25 мкМ с ингибированием $52,32 \pm 1,48$ % (Li et al., 2023c). Некоторые пептиды дозозависимо снижали выработку воспалительных цитокинов, таких как ADLAHLPF, FGDFNPGGRL и CKVWPPLH, которые ингибировали TNF-α на $73,19 \pm 5,31$ %, $68,44 \pm 5,63$ % и $73,83 \pm 0,81$ % соответственно при концентрации 100 мкМ. Однако ингибирующая способность некоторых пептидов не была дозозависимой; например, пептид KASFAFAGL сильнее всего ингибировал TNF-α и IL-6 при низких дозах, а пептид FGDFNPGGRL ингибировал IL-6 только при концентрации 50 мкМ. Эти явления могут быть связаны с клеточной толерантностью и зависеть от таких механизмов, как конформационные изменения, интернализация рецепторов и насыщение занятости. Кроме того, эти пептиды с противовоспалительной активностью содержат гидрофобные аминокислоты, например, GDRW, KASFAFAGL и FGDFNPGGRL содержали аспарагиновую кислоту и триптофан (Li et al., 2023c). Следовательно, состав и специфическое расположение аминокислот могут способствовать противовоспалительному действию пептидов. Противовоспалительная активность пептида обусловлена составом и положением аминокислот, а также образованием водородных связей и гидрофобных взаимодействий с iNOS. Однако, несмотря на большое количество исследований *in vitro* и на животных моделях, данные исследований на людях о противовоспалительной активности активных ингредиентов ферментированных фруктов и овощей отсутствуют. Более того, необходимо дополнительно изучить, можно ли добавлять эти компоненты, обладающие противовоспалительным действием, в натуральные противовоспалительные средства для ежедневного поддержания здоровья и профилактики заболеваний.

3.2. Другие преимущества ферментированных овощей и фруктов для здоровья

Ферментированные фрукты и овощи богаты пробиотиками, которые могут улучшить состав кишечной флоры и усилить барьерную функцию кишечника, чтобы снизить риск воспаления и метаболических нарушений (Eroglu et al., 2023; Wang et al., 2022d). Sheng et al. (2021) установили, что ферментированная пробиотиками черника (ФТЧ) снижает массу тела и уровень липидов и увеличивает количество полезных кишечных бактерий, таких как *Allobaculum* и *Blautia*, у крыс. ФТЧ снижает накопление жира, потенциально влияя на метаболизм жирных кислот и функцию адипоцитов, а также усиливая выработку короткоцепочечных жирных кислот, поддерживая здоровье кишечника и метаболическую регуляцию (Sheng et al., 2021). Аналогичным образом потребление ферментированной кимчи значительно снижало массу тела и накопление жира у мышей C57BL/6J и увеличивало численность *Akkermansia muciniphila* – кишечной бактерии, связанной с метаболическим здоровьем. Повышенное содержание уксусной кислоты в кимчи способствует здоровью кишечника, снижает уровни воспалительных факторов, таких как TNF-α и MCP-1, и уменьшает нейровоспаление (Kim et al., 2022b). Упомянутые короткоцепочечные жирные кислоты, такие как уксусная кислота, которая может вырабатываться в результате метаболической активности пробиотиков, полезны для регуляции липидного обмена, чтобы уменьшить накопление липидов (Xiao et al., 2023; Marnpae et al., 2024). Пробиотические метаболиты, которые регулируют баланс кишечной флоры, могут снизить накопление жира, влияя на метаболизм жирных кислот и функцию жировых клеток. Исследования *in vitro* показали, что метаболиты (индол-3-молочная кислота, лейциновая кислота и фенилмолочная кислота) из *Companilactobacillus allii* WiKim39 и *Lactococcus lactis* WiKim0124 ингибируют накопление липидов. В исследованиях *in vivo* ферментированный сок кимчи снижал накопление липидов, регулируя экспрессию генов, связанных с липогенезом, и активируя липолитические ферменты. Анализ обогащения онтологии генов показал, что дифференциально экспрессируемые белки в ФВС связаны с иммунными процессами, что свидетельствует об их противоожиренном потенциале (Lee et al., 2023). Пробиотики в ферментированных фруктах и овощах также могут улучшать метаболизм глюкозы и липидов и повышать чувствительность к инсулину, регулируя гормоны, секретируемые жировыми клетками, такие как адипонектин (АДН) и лептин (ЛЕП) (Wei et al., 2024). Ферментированные томаты (ФРТ), приготовленные из *L. plantarum* NCUN001046, модулируют сывороточные уровни метаболитов, таких как глицерофосфолипиды, сфинголипиды, ненасыщенные жирные кислоты и аминокислоты, что может быть связано с модуляцией адипокинов АДК и ЛЕП. АДК и ЛЕП помогают организму контролировать аппетит и снижать потребление пищи. Более того, ФРТ увеличивал относительное содержание полезных микроорганизмов, таких как *Roseburia*, *Coprococcus* и *Oscillospira*, которые отрицательно коррелировали с массой тела, липидами и уровнями воспалительных факторов (Wei et al., 2024).

Аспаратаминотрансфераза (АСТ) и аланинаминотрансфераза (АЛТ) являются двумя распространенными сывороточными ферментами, которые участвуют в метаболизме аминокислот в печени и других частях тела (Korcz et al., 2018). При нарушении функции печени АСТ и АЛТ высвобождаются в кровоток, что приводит к повышению уровня в сыворотке. Кроме того, нарушение функции печени может привести к нарушениям липидного обмена, увеличивая риск сердечно-сосудистых заболеваний (Goodarzi et al., 2019). Жидкий ферментированный экстракт из выжимок черники снизил повышенные уровни общего холестерина (ОХС), триацилглицеридов и холестерина липопротеинов низкой плотности (ЛПНП-хс) у мышей C57BL/6J и оказывал ингибирующее действие. Эти полезные изменения были связаны с полифенольными соединениями или пробиотическими штаммами в ферментированном экстракте. Таким образом, выжимка черники, ферментированная двумя молочнокислыми бактериями (*L. rhamnosus* GG и *L. plantarum*-1), может снизить риск гиперлипидемии и поражения печени, а также облегчить симптомы ожирения у мышей (Chai et al., 2024; Wang et al., 2023). Борьба с ожирением и снижение уровня липидов являются взаимодополняющими в профилактике и лечении хронических заболеваний. Комплексное управление весом и уровнем липидов позволяет эффективно снизить риск развития сопутствующих хронических заболеваний.

Ферментация фруктов и овощей представляет собой процесс микробной трансформации органических веществ, который сопровождается метаболитами, в том числе веществами с антимикробной активностью. Эти антимикробные вещества оказывают значительное влияние на безопасность и свежесть фруктовых и овощных продуктов (Burak et al., 2021). Во время ферментации пробиотики, такие как молочнокислые бактерии, производят органические кислоты и другие антимикробные вещества, которые подавляют или убивают патогены и организмы порчи, такие как *Salmonella enterica* и *E. coli*, путем снижения pH, разрушения клеточных мембран патогенов и вмешательства в клеточный метаболизм (Michalak et al., 2020). Ферментированный сок *L. plantarum* FBS05 содержит ряд метаболитов, таких как молочная кислота, уксусная кислота, ацетонин, ацетоацетат, низкомолекулярные пептиды и антимикробные фенольные соединения, которые убивают патогены и микроорганизмы, вызывающие порчу, тем самым увеличивая срок годности (Muhialdin et al., 2021). *L. plantarum* CXG9 со значительными антимикробными свойствами в традиционных китайских ферментированных овощах был способен продуцировать высокие концентрации LD-фенилмолочной кислоты (LD-PLA), которая эффективно подавляла рост пищевого патогена *Listeria*

monocytogenes при минимальной ингибирующей концентрации 2,4 мг/мл (Zhang et al., 2022). Ферментация увеличивает содержание бактериостатических компонентов, таких как полифенолы и флавоноиды, что приводит к более высокой ингибирующей концентрации бактериальную активность ферментированного сока облепихи, чем у неферментированного (Liu et al., 2023b; Бурак и др., 2021). Листья *Stevia rebaudiana*, ферментированные *S. cerevisiae* CGMCC и *L. plantarum* CGMCC, не только проявили значительную антимикробную активность в отношении пищевых бактерий, таких как *E. coli*, *Staphylococcus aureus* и *Bacillus subtilis*, но и их метаболиты, такие как катехол, галловая кислота и кемпферол, продемонстрировали высокую резистентность к клеткам HepG2 или SGC-7901 (Chai et al., 2024). Антимикробные и противоопухолевые механизмы этих продуктов ферментации открывают новые перспективы для изучения функциональности пищевых продуктов.

Микроорганизмы в ферментированных фруктах и овощах могут продуцировать бактериоцины, которые обладают антимикробной активностью и в основном являются антагонистами гомологичных или близкородственных штаммов. *B. subtilis* JSX-5, выделенный из ферментированной черники, продуцирует новый бактериоцин JS17, обладающий широким спектром антимикробных свойств. JS17 изменяет клеточную морфологию *E. coli*, разрушая клеточные мембраны и вызывая лизис клеток. JS17 также чувствителен к специфическим протеазам и содержит гидрофобные аминокислоты (Xiang et al., 2021). Пробиотики, такие как молочнокислые бактерии (LAB), могут подавлять вредные микроорганизмы, колонизируя поверхность фруктов и овощей и конкурируя с патогенами за питательные вещества.

Ферментированные фрукты и овощи также имеют множество преимуществ для здоровья. Так, например, пробиотики в ферментированных фруктах и овощах могут играть противодиабетическую роль, регулируя баланс кишечной флоры и усиливая барьерную функцию кишечника (da Silva et al., 2023b; de Assis et al., 2024). Кроме того, установлено, что биоактивные вещества в ферментированных фруктах и овощах, такие как полифенольные соединения и ГАМК, обладают потенциалом снижения артериального давления. Например, полифенолы снижают артериальное давление, улучшая функцию эндотелия сосудов и способствуя вазодилатации (Behl et al., 2020; Mohammadi et al., 2022). Кроме того, ферментированные фрукты и овощи оказывают положительное влияние на регуляцию уровня глюкозы в крови, они могут снижать уровень глюкозы в крови за счет повышения чувствительности к инсулину, стимулирования секреции инсулина и ингибирования активности α -амилазы. Ферментированные выжимки из фиников (ФВФ) с использованием штаммов дрожжей *I. orientalis* и *P. kudriavzevii* обладают противодиабетическим потенциалом. Установлено, что ФВФ показали повышенное ингибирование α -амилазы и α -глюкозидазы по сравнению с неферментированными, что может быть связано с микробной продукцией вторичных метаболитов, способных ингибировать активность ферментов, таких как полифенолы и органические кислоты (Ayyash et al., 2022; Wang et al., 2020a; b).

Подводя итог, можно сказать, что влияние ферментированных фруктов и овощей на здоровье взаимосвязано. Например, пробиотики могут косвенно влиять на регуляцию уровня глюкозы в крови и артериального давления, улучшая здоровье кишечника, тогда как полифенолы могут одновременно оказывать противодиабетическое и гипотензивное действие. Таким образом, дальнейшее изучение задействованных механизмов может быть полезным для разработки большего количества продуктов.

Заключение

Технология ферментации является эффективным методом переработки, который сочетает традиции и инновации, использующий микробную биотрансформацию для значительного улучшения химического состава и биологической активности фруктов и овощей. Эта технология не только продлевает срок годности пищевых продуктов, но и повышает их пищевую ценность и пользу для здоровья, предоставляя потребителям более здоровый выбор. Польза ферментированных фруктов и овощей для здоровья в основном обусловлена образованием в процессе ферментации биологически активных соединений, таких как фенолы, витамины, минералы и органические кислоты. Эти соединения образуются в результате сложных биохимических реакций, катализируемых микроорганизмами, и взаимодействуют друг с другом, оказывая антиоксидантное и противовоспалительное действие, что способствует снижению риска хронических заболеваний. Вместе с тем необходимо учитывать безопасность ферментированных фруктов и овощей, включая микробное загрязнение, химические опасности и загрязнение патогенными бактериями. Поэтому крайне важно проводить исследования безопасности ферментированных фруктов и овощей, уделяя особое внимание микробным изменениям, взаимосвязи между микроорганизмами и вкусом, а также предлагая соответствующие меры контроля.

Ключевым фактором является тщательный отбор и оценка штаммов ферментирующих микроорганизмов для обеспечения их безопасности, а также достоверный и эффективный контроль условий ферментации для предотвращения образования вредных микроорганизмов и веществ. Хотя процесс производства ферментированных продуктов может показаться простым, лежащие в его основе научные и технологические факторы сложны. Выбранные штаммы ферментирующих микроорганизмов должны быть тщательно оценены на безопасность (отсутствие генов лекарственной устойчивости, отсутствие гемолитических токсинов

и т. д.), физиологическую функцию (устойчивость к кислотам и желчным солям) и адаптивность. Кроме того, микробная трансформация активных компонентов фруктов и овощей, такая как гидролиз полисахаридов до биоактивных пептидов, требует дальнейшего углубленного изучения. Разработка ферментированных продуктов на основе фруктов и овощей представляет собой перспективное направление для удовлетворения запросов современного потребителя, сокращения отходов растительного сырья, расширения ассортимента функциональных пищевых продуктов, способствующих улучшению здоровья населения.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на углубленное изучение взаимодействия микроорганизмов с плодовоовощным сырьем и оптимизацию процесса ферментации с целью повышения их пищевой ценности и благотворного влияния на здоровье человека.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

References

- Abdelshafy, A. M., Rashwan, A. K., Osman, A. I. 2024. Potential food applications and biological activities of fermented quinoa: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 144. Article number: 104339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104339>.
- Ajala, E. O., Ajala, M. A., Onoriemu, O. O., Akinpelu, S. G. et al. 2021. Lactic acid production: Utilization of yam peel hydrolysate as a substrate using *Rhizopus oryzae* in kinetic studies. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(4), pp. 1031–1045. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.2213>.
- Akter, R., Ahn, J. C., Nahar, J., Awais, M. et al. 2022. Pomegranate juice fermented by tannin acyl hydrolase and *Lactobacillus vespulae* DCY75 enhance estrogen receptor expression and anti-inflammatory effect. *Frontiers in Pharmacology*, 13. Article number: 141270. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.1010103>.
- Ali, M. S., Lee, E.-B., Lee, S.-J., Lee, S.-P. et al. 2021. Aronia melanocarpa extract fermented by *Lactobacillus plantarum* EJ2014 modulates immune response in mice. *Antioxidants*, 10(8). Article number: 1276. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox10081276>.
- Alkalbani, N. S., Alam, M. Z., Al-Nabulsi, A., Osaili, T. M. et al. 2024. Unraveling the potential nutritional benefits of fermented date syrup waste: Untargeted metabolomics and carbohydrate metabolites of *in vitro* digested fraction. *Food Chemistry*, 442. Article number: 138483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138483>.
- Araújo, L. P., Vilela, H., Solinho, J., Pinheiro, R. et al. 2024. Enrichment of fruit peels' nutritional value by solid-state fermentation with *Aspergillus ibericus* and *Rhizopus oryzae*. *Molecules*, 29(15). Article number: 3563. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29153563>.
- Ayyash, M., Tarique, M., Alaryani, M., Al-Sbiei et al. 2022. Bioactive properties and untargeted metabolomics analysis of bioaccessible fractions of non-fermented and fermented date fruit pomace by novel yeast isolates. *Food Chemistry*, 396. Article number: 133666. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133666>.
- Azam, S. M. R., Ma, H. L., Xu, B. G., Devi, S. et al. 2020. Efficacy of ultrasound treatment in the removal of pesticide residues from fresh vegetables: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 97, pp. 417–432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.028>.
- Balyan, S., Dadwal, V., Patil, B. S. 2024. *Lactobacillus*-isolated exopolysaccharide as emulsifier ensure extended stability of eugenol encapsulation, potent anti-microbial activity, and application on fresh produce. *Food Bioscience*, 61. Article number: 104632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104632>.
- Bao, Y., Zhang, M., Chen, W., Chen, H. et al. 2021. Screening and evaluation of suitable non-*Saccharomyces* yeast for aroma improvement of fermented mango juice. *Food Bioscience*, 44. Article number: 101414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101414>.
- Behl, T., Bungau, S., Kumar, K., Zengin, G. et al. 2020. Pleiotropic effects of polyphenols in cardiovascular system. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 130. Article number: 110714. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110714>.
- Bi, P., Sun, W., Li, S., Liu, X. et al. 2024. Characterization of the effect of non-*Saccharomyces cerevisiae* on the non-volatile constituents and volatile profiles of low-alcoholic pomegranate beverages. *Food Bioscience*, 59. Article number: 103870. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103870>.
- Borgonovi, T. F., Casarotti, S. N., Penna, A. L. B. 2021. *Lactocaseibacillus casei* SJRP38 and buriti pulp increased bioactive compounds and probiotic potential of fermented milk. *LWT*, 143. Article number: 111124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111124>.
- Burak, L. Ch. 2025b. The influence of modern methods of processing and sterilization on the quality of fruit and vegetable raw materials and juice products. Monograph. Moscow. DOI: <https://doi.org/10.12737/2154991>. (In Russ.)
- Burak, L. Ch. 2025a. The influence of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the chemical composition and nutritional value of fruit and berry raw materials. *Innovations and Food Security*, 2(48), pp. 6–25. DOI: <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2025-48-2-6-25>. (In Russ.)

- Burak, L. Ch. 2024. Using modern processing technologies to increase the shelf life of fruits and vegetables. Review of the subject field. *Polzunovsky Vestnik*, 1, pp. 99–119. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013>. (In Russ.)
- Burak, L. Ch. 2024a. Limitations and possibilities of modern technologies to ensuring microbiological safety of food products. News of higher educational institutions. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3(396), pp. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1>. (In Russ.)
- Burak, L. Ch., Ermoshina, T. V., Samankova, N. V. 2024. Achieving sustainable development through the use of new food processing technologies. *Fundamental research*, 10, pp. 171–179. DOI: <https://doi.org/10.17513/fr.43705>. (In Russ.)
- Burak, L. Ch. 2023. Use of modern technologies in the production of fermented products. *Scientific Review. Technical science*, 5, pp. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.17513/srts.1446>. (In Russ.)
- Burak, L. Ch. 2022. Prospects for the use of lactic acid bacteria *L. Plantarum* for fruit juice fermentation. Review. *Scientific Review. Biological Sciences*, 3, pp. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.17513/srbs.1286>. (In Russ.)
- Burak, L. Ch., Sapach, A. N. 2021. Fermented food products using sea buckthorn fruit. Overview. *Chronos: Natural and Technical Sciences*, 6, 4(37), pp. 32–46. DOI: <https://doi.org/10.52013/2712-9691-37-4-5>. (In Russ.)
- Cai, L., Wang, W., Tong, J., Fang, L. et al. 2022. Changes of bioactive substances in lactic acid bacteria and yeasts fermented kiwifruit extract during the fermentation. *LWT*, 164. Article number: 113629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113629>.
- Camargo, D. A., Pereira, M. S., dos Santos, A. G., Fleuri, L. F. 2022. Isolated and fermented orange and grape wastes: Bromatological characterization and phytase, lipase and protease source. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77. Article number: 102978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102978>.
- Chai, L.-J., Lan, T., Cheng, Z., Zhang, J. et al. 2024. *Stevia rebaudiana* leaves fermented by *Lactobacillus plantarum* exhibit resistance to microorganisms and cancer cell lines *in vitro*: A potential sausage preservative. *Food Chemistry*, 432. Article number: 137187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137187>.
- Chen, L., Liu, R., Wu, M., Ge, Q. et al. 2024. A review on aroma-active compounds derived from branched-chain amino acid in fermented meat products: Flavor contribution, formation pathways, and enhancement strategies. *Trends in Food Science & Technology*, 145. Article number: 104371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104371>.
- Chen, Y., Chen, L., Liu, L., Bi, X. et al. 2023. Characteristics of microbial communities in fermentation of pickled ginger and their correlation with its volatile flavors. *Food Bioscience*, 53. Article number: 102736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102736>.
- Cheng, S., Wu, T., Zhang, H., Sun, Z. et al. 2023. Mining lactonase gene from aflatoxin B₁-degrading strain *Bacillus megaterium* and degrading properties of the recombinant enzyme. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(51), pp. 20762–20771. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c05725>.
- Cheng, Y., Tang, S., Wu, T., Pan, S. et al. 2022. *Lactobacillus casei*-fermented blueberry pomace ameliorates colonic barrier function in high fat diet mice through MAPK-NF-κB-MLCK signaling pathway. *Journal of Functional Foods*, 95. Article number: 105139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105139>.
- Chiorcea-Paquim, A-M. 2023. Electrochemistry of flavonoids: A comprehensive review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(21). Article number: 15667. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms242115667>.
- Crespo, L., Gaglio, R., Martínez, F. G., Martín, G. M. et al. 2021. Bioaccumulation of selenium-by fruit origin lactic acid bacteria in tropical fermented fruit juices. *LWT*, 151. Article number: 112103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112103>.
- Dawood, M. A. O., Eweedah, N. M., Khalafalla, M. M., Khalid, A. 2020. Evaluation of fermented date palm seed meal with *Aspergillus oryzae* on the growth, digestion capacity and immune response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Nutrition*, 26(3), pp. 828–841. DOI: <https://doi.org/10.1111/anu.13042>.
- da Silva, A. P. G., Sganzerla, W. G., John, O. D., Marchiosi, R. 2025. A comprehensive review of the classification, sources, biosynthesis, and biological properties of hydroxybenzoic and hydroxycinnamic acids. *Phytochemistry Reviews*, 24, pp. 1061–1090. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11101-023-09891-y>.
- da Silva, R. M., Santos, B. N., da Silva Oliveira, F. A., Filho, E. G. A. et al. 2025. Synbiotic sapota-do-solimões (*Quararibea cordata* Vischer) juice improves gut microbiota and short-chain fatty acid production in an *in vitro* model. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 17, pp. 668–680. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12602-023-10178-z>.
- de Assis, B. B.T., Pimentel, T. C., Vidal, H., dos Santos Lima, M. et al. 2024. Mangaba pulp fermented with *Lactocaseibacillus casei* 01 has improved chemical, technological, and sensory properties and positively impacts the colonic microbiota of vegan adults. *Food Research International*, 186. Article number: 114403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114403>.

- de Oliveira, S. D., Araújo, C. M., da Silva Campelo Borges, G., dos Santos Lima, M. et al. 2020. Improvement in physicochemical characteristics, bioactive compounds and antioxidant activity of acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) and guava (*Psidium guajava* L.) fruit by-products fermented with potentially probiotic lactobacilli. *LWT*, 134. Article number: 110200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110200>.
- Di Cagno, R., Filannino, P., Cantatore, V., Polo, A. et al. 2020. Design of potential probiotic yeast starters tailored for making a cornelian cherry (*Cornus mas* L.) functional beverage. *International Journal of Food Microbiology*, 323. Article number: 108591. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108591>.
- Dong, L., Qin, C., Li Y., Wu, Z. et al. 2022. Oat phenolic compounds regulate metabolic syndrome in high fat diet-fed mice via gut microbiota. *Food Bioscience*, 50, Part A. Article number: 101946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101946>.
- Dulf, F. V., Vodnar, D. C., Dulf, E.-H. 2023. Solid-state fermentation with *Zygomycetes fungi* as a tool for biofortification of apple pomace with γ -linolenic acid, carotenoid pigments and phenolic antioxidants. *Food Research International*, 173, Part 2. Article number: 113448. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113448>.
- EroğluF, E., Sanlier, N. 2023. Effect of fermented foods on some neurological diseases, microbiota, behaviors: Mini review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(26), pp. 8066–8082. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2053060>.
- Fahey, J. W., Kensler, T. W. 2021. Phytochemicals: Do they belong on our plate for sustaining healthspan? *Food Frontiers*, 2, pp. 235–239. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.81>.
- Fan, D., Liu, X., Shen, Z., Wu, P. et al. 2023. Cell signaling pathways based on vitamin C and their application in cancer therapy. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 162. Article number: 114695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.114695>.
- Gaglio, R., Pescuma, M., Madrid-Albarrán, Y., Franciosi, E. et al. 2021. Selenium bio-enrichment of mediterranean fruit juices through lactic acid fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 354. Article number: 109248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109248>.
- Gao, B., Wang, J., Wang, Y., Xu, Z. et al. 2022. Influence of fermentation by lactic acid bacteria and in vitro digestion on the biotransformations of blueberry juice phenolics. *Food Control*, 133. Article number: 108603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108603>.
- Giroto, O. S., Furlan, O. O., Moretti Junior, R. C., Goulart, R. A. et al. 2025. Effects of apples (*Malus domestica*) and their derivatives on metabolic conditions related to inflammation and oxidative stress and an overview of by-products use in food processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(19), pp. 3785–3816. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2372690>.
- Goodarzi, R., Sabzian, K., Shishehbor, F., Mansoori, A. 2019. Does turmeric/curcumin supplementation improve serum alanine aminotransferase and aspartate aminotransferase levels in patients with nonalcoholic fatty liver disease? A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Phytotherapy Research*, 33, pp. 561–570. DOI: <https://doi.org/10.1002/ptr.6270>.
- Grujović, M. Ž., Mladenović, K. G., Smedo-Lemsaddek, T., Laranjo, M. et al. 2022. Advantages and disadvantages of non-starter lactic acid bacteria from traditional fermented foods: Potential use as starters or probiotics. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21, pp. 1537–1567. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12897>.
- Gulsunoglu-Konuskan, Z., Kilic-Akyilmaz, M. 2022 Microbial bioconversion of phenolic compounds in agro-industrial wastes: A review of mechanisms and effective factors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(23), pp. 6901–6910. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06888>.
- Hajar-Azhari, S., Daud, N., Muhialdin, B. J., Joghee, N. et al. 2023. Lacto-fermented garlic sauce improved the quality and extended the shelf life of lamb meat under the chilled condition. *International Journal of Food Microbiology*, 395. Article number: 110190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110190>.
- Han, Y., Du, J. 2023. A comparative study of the effect of bacteria and yeasts communities on inoculated and spontaneously fermented apple cider. *Food Microbiology*, 111. Article number: 104195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2022.104195>.
- Ibarruri, J., Cebrián, M., Hernández, I. 2021. Valorisation of fruit and vegetable discards by fungal submerged and solid-state fermentation for alternative feed ingredients production. *Journal of Environmental Management*, 281. Article number: 111901. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111901>.
- Ishii, T., Warabi, E., Mann, G. E. 2022. Mechanisms underlying Nrf2 nuclear translocation by non-lethal levels of hydrogen peroxide: P38 MAPK-dependent neutral sphingomyelinase2 membrane trafficking and ceramide/PKC ζ /CK2 signaling. *Free Radical Biology and Medicine*, 191, pp. 191–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2022.08.036>.
- Jastrzębska, A., Kmiecik, A., Brzuzy, K., Gralak, Z. et al. 2023. Determination of selected biogenic amines in fermented vegetables juices. *Food Control*, 154. Article number: 109980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109980>.

- Ji, G., Liu, G., Li, B., Tan, H. et al. 2023. Influence on the aroma substances and functional ingredients of apple juice by lactic acid bacteria fermentation. *Food Bioscience*, 51. Article number: 102337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102337>.
- Jiang, X., Lu, Y., Liu, S. Q. 2020. Effects of pectinase treatment on the physicochemical and oenological properties of red dragon fruit wine fermented with *Torulaspora delbrueckii*. *LWT*, 132. Article number: 109929. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109929>.
- Jin, Y., Qi, Y., Fan, M., Zhang, J. et al. 2023. Biotransformation of carbendazim in cowpea pickling process. *Food Chemistry*, 415. Article number: 135766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135766>.
- Karim, N., Rashwan, A. K., Liu, S., Tangpong, J. et al. 2023. An updated review on chemical compositions, biological capabilities, and clinical benefits of cranberries. *Food Bioscience*, 54. Article number: 102877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102877>.
- Kim, D.-Y., Kim, J.-H., Shin, H.-S. 2022a. Improving the quality of fermented soybean products using low-frequency airborne ultrasonicated Koji. *LWT*, 168. Article number: 113936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113936>.
- Kim, G. Y., Kim, S.-A., Kong, S. Y., Seong, H. et al. 2023. Synergistic antioxidant and anti-inflammatory activities of kale juice fermented with *Limosilactobacillus reuteri* EFEL6901 or *Limosilactobacillus fermentum* EFEL6800. *Antioxidants*, 12(10). Article number: 1850. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12101850>.
- Kim, N., Lee, J., Song, H. S., Oh, Y. J. et al. 2022b. Kimchi intake alleviates obesity-induced neuroinflammation by modulating the gut-brain axis. *Food Research International*, 158. Article number: 111533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111533>.
- Korcz, E., Kerényi, Z., Varga, L. 2018. Dietary fibers, prebiotics, and exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria: Potential health benefits with special regard to cholesterol-lowering effects. *Food & Function*, 9(6), pp. 3057–3068. DOI: <https://doi.org/10.1039/c8fo00118a>.
- Küçük, N., Şahin, S., Çağlayan, M. O. 2024. An overview of biosensors for the detection of patulin focusing on aptamer-based strategies. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 54(7), pp. 2422–2434. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408347.2023.2172677>.
- Küçükgöz, K., Echave, J., Garcia-Oliveira, P., Seyyedi-Mansour, S. et al. 2025. Polyphenolic profile, processing impact, and bioaccessibility of apple fermented products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(3), pp. 507–526. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2277353>.
- Lan, T., Lv, X., Zhao, Q., Lei, Y., Gao, C. et al. 2023. Optimization of strains for fermentation of kiwifruit juice and effects of mono- and mixed culture fermentation on its sensory and aroma profiles. *Food Chemistry: X*, 17. Article number: 100595. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100595>.
- Laophongphit, A., Siripornadulsil, S., Siripornadulsil, W. 2023. Improvements in the functions of probiotic-based mango pulp rich in phenolic and proline antioxidants by treatment with pectinase and fermentation with lactic acid bacteria. *LWT*, 181. Article number: 114756. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114756>.
- Lee, M., Yun, Y.-R., Choi, E. J., Song, J. H. et al. 2023. Anti-obesity effect of vegetable juice fermented with lactic acid bacteria isolated from kimchi in C57BL/6J mice and human mesenchymal stem cells. *Food & Function*, 14(3), pp. 1349–1356. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2fo02998g>.
- Lee, S., Han, A., Jo, S., Cheon, H. et al. 2021. Microbiological quality and safety of commercial fresh fruit and vegetable juices in Korea. *LWT*, 152. Article number: 112432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112432>.
- Li, J., Bai, J., Li, S., Zhu, Z. et al. 2020. Effect of lactic acid bacteria on the postharvest properties of fresh lotus root. *Postharvest Biology and Technology*, 160. Article number: 110983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110983>.
- Li, X.-Y., Meng, L., Shen, L., Ji, H.-F. 2023a. Regulation of gut microbiota by vitamin C, vitamin E and β -carotene. *Food Research International*, 169. Article number: 112749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112749>.
- Li, Y., Ding, P., Tang, X., Zhu, W. et al. 2023b. Screening and oenological property analysis of ethanol-tolerant non-Saccharomyces yeasts isolated from *Rosa roxburghii* Tratt. *Frontiers in Microbiology*, 14. Article number: 1202440. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1202440>.
- Li, Y., Gao, X., Pan, D., Liu, Z. et al. 2023c. Identification and virtual screening of novel anti-inflammatory peptides from broccoli fermented by *Lactobacillus* strains. *Frontiers in Nutrition*, 9. Article number: 1118900. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1118900>.
- Li, Y., Luo, X., Guo, H., Bai, J. et al. 2023d. Metabolomics and metatranscriptomics reveal the influence mechanism of endogenous microbe (*Staphylococcus succinus*) inoculation on the flavor of fermented chili pepper. *International Journal of Food Microbiology*, 406. Article number: 110371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110371>.
- Liu, L., Li, G., Cui, L., Cai, R. et al. 2024. The health benefits of fermented fruits and vegetables and their underlying mechanisms. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23. Article number: e70072. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70072>.

- Liu, S., Li, Y., Song, X., Hu, X. et al. 2023a. Changes in volatile and nutrient components of mango juice by different lactic acid bacteria fermentation. *Food Bioscience*, 56. Article number: 103141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103141>.
- Liu, S.-n., Han, Y., Zhou, Z.-j. 2011. Lactic acid bacteria in traditional fermented Chinese foods. *Food Research International*, 44(3), pp. 643–651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.034>.
- Liu, X., Lv, M., Maimaitiyiming, R., Chen, K. 2023b. Development of fermented sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) juice and investigation of its antioxidant and antimicrobial activity. *Frontiers in Nutrition*, 10. Article number: 1120748. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1120748>.
- Liu, Y., Sheng, J., Li, J., Zhang, P. et al. 2022. Influence of lactic acid bacteria on physicochemical indexes, sensory and flavor characteristics of fermented sea buckthorn juice. *Food Bioscience*, 46. Article number: 101519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101519>.
- Lv, M., Liu, X., Chen, K., Aihaiti, A. et al. 2023. Effects of adding milk to fermented black mulberry (*Morus nigra* L.) juice on its antioxidant activity in C2C12 cells and changes in volatile flavor compounds during storage. *Food Chemistry: X*, 20. Article number: 101029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101029>.
- Marnpae, M., Balmori, V., Kamonsuwan, K., Nungarlee, U. et al. 2024. Modulation of the gut microbiota and short-chain fatty acid production by gac fruit juice and its fermentation in *in vitro* colonic fermentation. *Food & Function*, 15(7), pp. 3640–3652. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3fo04318e>.
- Martínez-Mendoza, B.I., Peredo-Lovillo, A., Romero-Luna, H.E., Jiménez-Fernández, M. 2023. Antioxidant and anti-inflammatory properties of yeasts fermented passion fruit and soursop pulps: A focus on bioactive volatile compounds profile. *Food Bioscience*, 56. Article number: 103112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103112>.
- Meira, D. I., Barbosa, A. I., Borges, J., Reis, R. L. 2024. Recent advances in nanomaterial-based optical biosensors for food safety applications: Ochratoxin-A detection, as case study. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(18), pp. 6318–6360. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2168248>.
- Méndez-Galarraga, M. P., Hurtado-Romero, A., Pirovani, M. É., Vinderola, G. et al. 2023. Exploring autochthonous strains with probiotic potential: A comprehensive characterization of functional properties and their application in fermented blueberry-watermelon smoothies. *Food Bioscience*, 56. Article number: 103173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103173>.
- Michalak, M., Kubik-Komar, A., Waśko, A., Polak-Berecka, M. 2020. Starter culture for curly kale juice fermentation selected using principal component analysis. *Food Bioscience*, 35. Article number: 100602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100602>.
- Mir, S. M., Ravuri, H. G., Pradhan, R. K., Narra, S. et al. 2018. Ferulic acid protects lipopolysaccharide-induced acute kidney injury by suppressing inflammatory events and upregulating antioxidant defenses in Balb/c mice. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 100, pp. 304–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.01.169>.
- Misci, C., Taskin, E., Dall'Asta, M., Fontanella, M. C. et al. 2021. Fermentation as a tool for increasing food security and nutritional quality of indigenous African leafy vegetables: The case of *Cucurbita* sp. *Food Microbiology*, 99. Article number: 103820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103820>.
- Misci, C., Taskin, E., Vaccari, F., Dall'Asta, M. et al. 2022. Evolution of microbial communities and nutritional content of fermented *Amaranthus* sp. Leaves. *International Journal of Food Microbiology*, 362. Article number: 109445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109445>.
- Mohammadi, S., Mazloomi, S. M., Niakousari, M., Far, G. et al. 2022. Evaluating the effects of dark chocolate formulated with micro-encapsulated fermented garlic extract on cardio-metabolic indices in hypertensive patients: A crossover, triple-blind placebo-controlled randomized clinical trial. *Phytotherapy Research*, 36(4), pp. 1785–1796. DOI: <https://doi.org/10.1002/ptr.7421>.
- Mota, J. C., Almeida, P. P., Freitas, M. Q., Stockler-Pinto, M. B. et al. 2023. Far from being a simple question: The complexity between *in vitro* and *in vivo* responses from nutrients and bioactive compounds with antioxidant potential. *Food Chemistry*, 402. Article number: 134351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134351>.
- Muhialdin, B. J., Kadum, H., Hussin, A. S. M. 2021. Metabolomics profiling of fermented cantaloupe juice and the potential application to extend the shelf life of fresh cantaloupe juice for six months at 8 °C. *Food Control*, 120. Article number: 107555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107555>.
- Multari, S., Guzzon, R., Caruso, M., Licciardello, C. et al. 2021. Alcoholic fermentation of citrus flavedo and albedo with pure and mixed yeast strains: Physicochemical characteristics and phytochemical profiles. *LWT – Food Science and Technology*, 144. Article number: 111133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111133>.
- Paśko, P., Galanty, A., Dymerski, T., Kim, Y.-M. et al. 2024. Physicochemical and volatile compounds analysis of fruit wines fermented with *Saccharomyces cerevisiae*: FTIR and microscopy study with focus on anti-inflammatory potential. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(11). Article number: 5627. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25115627>.

- Patil, P. S., Deshannavar, U. B., Ramasamy, M., Emani, S. 2021. Production, optimization, and characterization of sugarcane (*Saccharum officinarum*) – papaya (*Carica papaya*) wine using *Saccharomyces cerevisiae*. *Environmental Technology & Innovation*, 21. Article number: 101290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101290>.
- Peng, M., Zhang, Z., Xu, X., Zhang, H. et al. 2023. Purification and characterization of the enzymes from *Brevundimonas naejangsensis* that degrade ochratoxin A and B. *Food Chemistry*, 419. Article number: 135926. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135926>.
- Pérez-Armendáriz, B., Cardoso-Ugarte, G. A. 2020. Traditional fermented beverages in Mexico: Biotechnological, nutritional, and functional approaches. *Food Research International*, 136. Article number: 109307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109307>.
- Pi, X., Sun, Y., Cheng, J., Fu, G. et al. 2023. A review on polyphenols and their potential application to reduce food allergenicity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(29), pp. 10014–10031. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2078273>.
- Qin, T., Liao, J., Zheng, Y., Zhang, W. et al. 2021. Oenological characteristics of four non-saccharomyces yeast strains with β -glycosidase activity. *Frontiers in Microbiology*, 12. Article number: 626920. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.626920>.
- Ramires, F. A., Durante, M., D'Antuono, I., Garbetta, A. et al. 2024. Novel fermentation strategies of strawberry tree *Arbutus unedo* fruits to obtain high nutritional value products. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(2). Article number: 684. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25020684>.
- Rózańska, A., Fabjanowicz, M., Kalinowska, K., Polkowska, Ż. 2022. Green, simple analytical method for biogenic amines determination in fruit juice samples using salting-out assisted liquid-liquid microextraction and gas chromatography-mass spectrometry. *Food Chemistry*, 384. Article number: 132557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132557>.
- Saha Turna, N., Comstock, S. S., Gangur, V., Wu, F. 2024. Effects of aflatoxin on the immune system: Evidence from human and mammalian animal research. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(27), pp. 9955–9973. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2219336>.
- Salas-Millán, J.-Á., Aznar, A., Conesa, E., Conesa-Bueno, A. et al. 2022. Functional food obtained from fermentation of broccoli by-products (stalk): Metagenomics profile and glucosinolate and phenolic compounds characterization by LC-ESI-QqQ-MS/MS. *LWT*, 169. Article number: 113915. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113915>.
- Salehi, F., Aghajanzadeh, S. 2020. Effect of dried fruits and vegetables powder on cakes quality: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 95, pp. 162–172. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.011>.
- Saud, S., Xiaojuan, T., Fahad, S. 2024. The consequences of fermentation metabolism on the qualitative qualities and biological activity of fermented fruit and vegetable juices. *Food Chemistry: X*, 21. Article number: 101209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101209>.
- Shen, F., Cheng, X., He, C., Jiang, T. et al. 2024. Exogenous inoculation of *Pediococcus pentosaceus* SSC12 positively regulates anthocyanin biosynthesis to alleviate browning of postharvest litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). *LWT*, 207. Article number: 116644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116644>.
- Sheng, Z., Yu, L., Li, X., Zhao, Y. et al. 2021. The anti-obesity effect of fermented tremella/blueberry and its potential mechanisms in metabolically healthy obese rats. *Journal of Functional Foods*, 86. Article number: 104670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104670>.
- Shin, C., Lim, Y., Lim, H., Ahn, T.-B. 2020. Plasma short-chain fatty acids in patients with Parkinson's disease. *Movement Disorders*, 35, pp. 1021–1027. DOI: <https://doi.org/10.1002/mds.28016>.
- Shiota, M., Saitou, K., Mizumoto, H., Matsusaka, M. et al. 2010. Rapid detoxification of cereulide in *Bacillus cereus* food poisoning. *Pediatrics*, 125(4), pp. e951–e955. DOI: <https://doi.org/10.1542/peds.2009-2319>.
- Shuai, X., Dai, T., McClements, D. J., Ruan, R. et al. 2023. Hypolipidemic effects of macadamia oil are related to AMPK activation and oxidative stress relief: *In vitro* and *in vivo* studies. *Food Research International*, 168. Article number: 112772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112772>.
- Surai, P. F., Surai, A., Earle-Payne, K. 2024. Silymarin and inflammation: Food for thoughts. *Antioxidants*, 13(1). Article number: 98. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox13010098>.
- Świder, O., Łukasz Roszko, M., Wójcicki, M., Szymczyk, K. 2020. Biogenic amines and free amino acids in traditional fermented vegetables dietary risk evaluation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(3), pp. 856–868. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b05625>.
- Tang, Z., Wang, Q., Zhao, Z., Shen, N. 2023. Evaluation of fermentation properties, antioxidant capacity *in vitro* and *in vivo*, and metabolic profile of a fermented beverage made from apple and cantaloupe. *LWT*, 179. Article number: 114661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114661>.
- Van Beeck, W., Verschueren, C., Wuyts, S., van den Broek, M. F. L. et al. 2020. Robustness of fermented carrot juice against *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium* and *Escherichia coli* O157:H7. *International Journal of Food Microbiology*, 335. Article number: 108854. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108854>.

- Wang, B., Zhao, N., Li, J., Xu, R. et al. 2021a. Selenium-enriched *Lactobacillus plantarum* improves the antioxidant activity and flavor properties of fermented *Pleurotus eryngii*. *Food Chemistry*, 345. Article number: 128770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128770>.
- Wang, D., Chen, G., Tang, Y., Li, J. et al. 2022a. Correlation between autochthonous microbial communities and flavor profiles during the fermentation of mustard green paocai (*Brassica juncea* Coss.), a typical industrial-scaled salted fermented vegetable. *LWT*, 172. Article number: 114212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114212>.
- Wang, D., Deng, Y., Zhao, L., Wang, K. et al. 2023. GABA and fermented litchi juice enriched with GABA promote the beneficial effects in ameliorating obesity by regulating the gut microbiota in HFD-induced mice. *Food & Function*, 14(18), pp. 8170–8185. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2fo04038g>.
- Wang, J., Xie, B., Sun, Z. 2021b. Quality parameters and bioactive compound bioaccessibility changes in probiotics fermented mango juice using ultraviolet-assisted ultrasonic pre-treatment during cold storage. *LWT – Food Science and Technology*, 137. Article number: 110438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110438>.
- Wang, L.-S., Echeveste, C. E., Yu, J., Huang, Y.-W. et al. 2020a. Can natural products suppress resistant *Helicobacter pylori* to fight against gastric diseases in humans? *eFood*, 1, pp. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.2991/efood.k.200211.001>.
- Wang, L.-S., Mo, Y. Y., Huang, Y.-W., Echeveste, C. E. et al. 2020b. Effects of dietary interventions on gut microbiota in humans and the possible impacts of foods on patients' responses to cancer immunotherapy. *eFood*, 1, pp. 279–287. DOI: <https://doi.org/10.2991/efood.k.200824.002>.
- Wang, R., Guo, S. 2021c. Phytic acid and its interactions: Contributions to protein functionality, food processing, and safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20, pp. 2081–2105. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12714>.
- Wang, X., Liu, X., Long, J., Shen, K. et al. 2024. Isolation, screening, and application of aroma-producing yeast for red dragon fruit wine. *Food Bioscience*, 59. Article number: 103878. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103878>.
- Wang, X., Wang, Y., Han, M., Liang, J. et al. 2022b. Evaluating the changes in phytochemical composition, hypoglycemic effect, and influence on mice intestinal microbiota of fermented apple juice. *Food Research International*, 155. Article number: 110998. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.110998>.
- Wang, Y., Li, H. C., Ren, Y. C., Wang, Y. Q. et al. 2022d. Preparation, model construction and efficacy lipid-lowering evaluation of kiwifruit juice fermented by probiotics. *Food Bioscience*, 47. Article number: 101710. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101710>.
- Wang, Y., Wang, J., Cai, Z., Huang, H. et al. 2022e. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from *Rosa roxburghii* pomace fermented by *Bacillus natto*. *Food Bioscience*, 50. Article number: 102030. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102030>.
- Wang, Y. X., Li, H., Li, X. Z., Wang, C. X. et al. 2022c. Widely targeted metabolomics analysis of enriched secondary metabolites and determination of their corresponding antioxidant activities in *Elaeagnus angustifolia* var. *orientalis* (L.) kuntze fruit juice enhanced by *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* HN-3 fermentation. *Food Chemistry*, 374. Article number: 131568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131568>.
- Wei, B. L., Peng, Z., Zheng, W. D., Yang, S. Y. et al. 2024. Probiotic-fermented tomato alleviates high-fat diet-induced obesity in mice: Insights from microbiome and metabolomics. *Food Chemistry*, 436. Article number: 137719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137719>.
- Wu, W., Zhu, Q. G., Wang, W. Q., Grierson, D. et al. 2022. Molecular basis of the formation and removal of fruit astringency. *Food Chemistry*, 372. Article number: 131234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131234>.
- Xiang, Y. Z., Li, X. Y., Zheng, H. L., Chen, J. Y. et al. 2021. Purification and antibacterial properties of a novel bacteriocin against *Escherichia coli* from *Bacillus subtilis* isolated from blueberry ferments. *LWT – Food Science and Technology*, 146. Article number: 111456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111456>.
- Xiao, X. W., Li, S. Y., Zhou, X. B., Li, M. et al. 2023. The anti-obesogenic effects and underpinning mechanisms of fermented plant-based foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 136, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.04.007>.
- Xie, H., Gao, P. Y., Lu, Z. M., Wang, F. Z. et al. 2023. Changes in physicochemical characteristics and metabolites in the fermentation of goji juice by *Lactiplantibacillus plantarum*. *Food Bioscience*, 54. Article number: 102881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102881>.
- Xu, H., Feng, L., Deng, Y., Chen, L. et al. 2023. Change of phytochemicals and bioactive substances in *Lactobacillus* fermented citrus juice during the fermentation process. *LWT*, 180. Article number: 114715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114715>.
- Xu, X., Bi, S., Lao, F., Chen, F. et al. 2021a. Comprehensive investigation on volatile and non-volatile metabolites in broccoli juices fermented by animal- and plant-derived *Pediococcus pentosaceus*. *Food Chemistry*, 341. Article number: 128118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128118>.

- Xu, X., Bi, S., Lao, F., Chen, F. et al. 2021b. Induced changes in bioactive compounds of broccoli juices after fermented by animal- and plant-derived *Pediococcus pentosaceus*. *Food Chemistry*, 357. Article number: 129767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129767>.
- Yang, C. X., Yao, J. Q., Zhang, T., Yang, K. M. et al. 2024. Mixed fermentation of navel orange peel by *Trichoderma viride* and *Aspergillus niger*: Effects on the structural and functional properties of soluble dietary fiber. *Food Bioscience*, 57. Article number: 103545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103545>.
- Yun, Y.-R., Lee, M., Song, J. H., Choi, E. J. et al. 2022. Immunomodulatory effects of *Companilactobacillus allii* WiKim39 and *Lactococcus lactis* wikim0124 isolated from kimchi on lipopolysaccharide-induced RAW264.7 cells and dextran sulfate sodium-induced colitis in mice. *Journal of Functional Foods*, 90. Article number: 104969. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.104969>.
- Zeinali, M., Rezaee, S. A., Hosseinzadeh, H. 2017. An overview on immunoregulatory and anti-inflammatory properties of chrysin and flavonoids substances. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 92, pp. 998–1009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2017.06.003>.
- Zhang, J., Zhang, C., Lei, P., Xin, X. et al. 2022. Isolation, purification, identification, and discovery of the antibacterial mechanism of 4d-phenyllactic acid produced by *Lactiplantibacillus plantarum* CXG9 isolated from a traditional Chinese fermented vegetable. *Food Control*, 132. Article number: 108490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108490>.
- Zhang, L. H., Zhang, M., Mujumdar, A. S. 2021. New technology to overcome defects in production of fermented plant products – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 116, pp. 829–841. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.014>.
- Zhao, D., Cao, J. H., Jin, H. Q., Shan, Y. K. et al. 2021a. Beneficial impacts of fermented celery (*Apium graveolens* L.) juice on obesity prevention and gut microbiota modulation in high-fat diet fed mice. *Food & Function*, 12(19), pp. 9151–9164. DOI: <https://doi.org/10.1039/d1fo00560j>.
- Zhao, N., Huang, Y., Lai, H., Wang, Y. et al. 2023a. Illumination and reconstruction of keystone microbiota for reproduction of key flavor-active volatile compounds during paocai (a traditional fermented vegetable) fermentation. *Food Bioscience*, 56. Article number: 103148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103148>.
- Zhao, N., Lai, H., Wang, Y., Huang, Y. et al. 2021b. Assessment of biogenic amine and nitrite production in low-salt Paocai during fermentation as affected by reused brine and fresh brine. *Food Bioscience*, 41. Article number: 100958. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100958>.
- Zhao, N., Lai, H. M., He, W., Wang, Y. L. et al. 2021c. Reduction of biogenic amine and nitrite production in low-salt Paocai by controlled package during storage: A study comparing vacuum and aerobic package with conventional salt solution package. *Food Control*, 123. Article number: 107858. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107858>.
- Zhao, Q., Wang, Z., Yu, Z., Gao, Z. et al. 2023b. Influence on physical properties and digestive characters of fermented coconut milk with different loading proportion of skimmed coconut drink using *Lactiplantibacillus plantarum* MWLp-4 from human milk mixing with commercial bacteria. *Food Bioscience*, 53. Article number: 102598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102598>.
- Zhu, F., Du, B., Xu, B. 2018. Anti-inflammatory effects of phytochemicals from fruits, vegetables, and food legumes: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(8), pp. 1260–1270. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1251390>.

Сведения об авторе

Бурак Леонид Чеславович – ул. Пономаренко, 35А, г. Минск, Республика Беларусь, 220015;
Общество с ограниченной ответственностью "БЕЛРОСАКВА",
д-р философии в области пищевых наук (PhD), канд. техн. наук;
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Leonid Ch. Burak – 35A Ponomarenko Str., Minsk, Republic of Belarus, 220015;
Limited Liability Company "BELROSAKVA", PhD, Cand. Sci. (Engineering);
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

УДК 664:582.635.5

Крапива двудомная *Urtica dioica* L. в пищевой промышленности: обзор предметного поля и перспективы использования

А. Ю. Шариков*, А. А. Голубев, М. В. Амелякина, В. В. Иванов, И. М. Абрамова

*Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, г. Москва, Россия;
e-mail: anton.sharikov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9483-5209>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
10.06.2026;

принята
к публикации
09.07.2026

Ключевые слова:

крапива двудомная
Urtica dioica,
пищевая
промышленность,
химический состав,
технологии,
функциональные
продукты

Крапива двудомная *Urtica dioica* L. представляет интерес как нетрадиционное растительное сырье с высоким содержанием нутриентов и биологически активных веществ. Целью настоящей работы являлся анализ современного состояния исследований, посвященных химическому составу крапивы двудомной, ее пищевому применению и технологическим перспективам использования в составе продуктов с повышенной пищевой ценностью. Обзор выполнен как анализ предметного поля с элементами библиометрического и тематического подходов. Поиск публикаций за 2005–2026 гг. проводили на платформах Google Scholar и Semantic Scholar. Итоговый массив составил 327 источников, из которых 133 были непосредственно связаны с пищевыми технологиями. Для обработки библиографической информации и картирования структуры исследований применяли пакеты программ Zotero и VOSviewer соответственно. Показано, что современное предметное поле формируется вокруг нескольких направлений: изучения химического состава и биологически активных компонентов, фармакологических эффектов и пищевого применения крапивы. Наиболее активно крапива используется в хлебобулочных, макаронных, кондитерских, молочных, мясных продуктах и напитках, преимущественно как обогащающий ингредиент, повышающий содержание пищевых волокон, минеральных веществ, каротиноидов, фенольных соединений и антиоксидантную активность. Вместе с тем расширение дозировки часто сопровождается ухудшением технологических и сенсорных характеристик, что требует оптимизации формы внесения и уровня добавки. Крапива двудомная *Urtica dioica* обладает высоким потенциалом для ее использования в качестве ингредиента функциональных пищевых систем при условии стандартизации сырья и технологической адаптации к конкретным пищевым системам.

Для цитирования

Шариков А. Ю. и др. Крапива двудомная *Urtica dioica* L. в пищевой промышленности: обзор предметного поля и перспективы использования. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 479–496. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-479-496>.

Stinging nettle *Urtica dioica* L. in the food industry: A review of the research landscape and prospects for its use

Anton Yu. Sharikov*, Alexey A. Golubev, Maria V. Amelyakina,
Victor V. Ivanov, Irina M. Abramova

*Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – Branch of the Federal Research Centre
of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia;
e-mail: anton.sharikov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9483-5209>

Article info

Received
10.06.2026;

accepted
09.07.2026

Key words:

stinging nettle,
Urtica dioica,
food industry,
chemical composition,
food technologies,
functional foods

Abstract

Stinging nettle *Urtica dioica* L. is of interest as a non-conventional plant raw material rich in nutrients and biologically active compounds. The aim of this review is to analyse the current state of research on the chemical composition of stinging nettle, its food applications, and its technological potential as an ingredient in foods with enhanced nutritional value. The review has been conducted as an analysis of the research landscape incorporating bibliometric and thematic approaches. Publications issued between 2005 and 2026 were searched using the Google Scholar and Semantic Scholar platforms. The final dataset comprised 327 sources, of which 133 were directly related to food technologies. Zotero and VOSviewer software were used for processing bibliographic information and mapping the structure of the research field, respectively. The findings have shown that the current research landscape is centred on several major areas: the chemical composition and biologically active components of stinging nettle, its pharmacological effects, and its applications in food products. Stinging nettle is found to be used most extensively in bakery, pasta, confectionery, dairy, and meat products, as well as in beverages, primarily as an enriching ingredient that increases the content of dietary fibre, minerals, carotenoids, and phenolic compounds and enhances antioxidant activity. At the same time, increasing the level of nettle supplementation is often associated with deterioration in technological and sensory properties indicating the need to optimise both the form and the amount of the added ingredient. It has been concluded that *Urtica dioica* has considerable potential as an ingredient in functional food systems provided that the raw material is standardised and technologically adapted to specific food matrices.

For citation

Sharikov, A. Yu. et al. 2026. Stinging nettle *Urtica dioica* L. in the food industry: A review of the research landscape and prospects for its use. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 479–496. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-479-496>.

Введение

Крапива двудомная *Urtica dioica* L. представляет интерес как растительное сырье с выраженным пищевым и биологическим потенциалом. В обзорных публикациях она рассматривается как лекарственное растение и как вид, пригодный для использования в питании и различных прикладных технологиях (Bhusal et al., 2022; Grauso et al., 2020; Kregiel et al., 2018). Широкие возможности применения *Urtica dioica* связаны с разнообразием содержащихся в нем нутритивно и физиологически значимых компонентов, а также географической распространенностью растения (Bhusal et al., 2022; Devkota et al., 2022; Jan et al., 2017).

Современные обзоры показывают, что крапива является источником белка, пищевых волокон, витаминов, минеральных веществ, каротиноидов, фенольных соединений, флавоноидов и фенольных кислот. Это позволяет рассматривать ее как перспективный ингредиент для обогащения пищевых систем, в том числе при создании функциональных продуктов питания (Bhusal et al., 2022; Devkota et al., 2022; Đurović et al., 2024; Jan et al., 2017). Наиболее устойчиво в литературе подчеркивается значимость крапивы как источника фенольных и полифенольных соединений, каротиноидов, витаминов и минеральных веществ, определяющих ее антиоксидантный и нутритивный профиль (Đurović et al., 2017; 2024; Дезграф и др., 2021; Яцюк и др., 2006).

Несмотря на значительный объем работ, посвященных *Urtica dioica*, структура исследований остается неоднородной. Существенная часть публикаций сосредоточена на ботанических характеристиках, фитохимическом составе и фармакологической активности растения, тогда как его применение в пищевых технологиях освещено менее системно. Более широкий межатраслевой обзор (Toplicean et al., 2024) показывает, что *Urtica dioica* представляет собой многоцелевое растение с потенциалом использования в пищевой промышленности, медицине, текстильной отрасли. Вместе с тем авторы отмечают наличие исследовательских пробелов, связанных с масштабированием переработки, стандартизацией сырья и экономической реализуемостью технологических решений. Это особенно важно для пищевого направления, где высокая биологическая ценность сырья еще не гарантирует успешной интеграции в реальные процессы переработки.

В этой связи представляется актуальным систематизировать литературные данные о *Urtica dioica* именно в контексте пищевого применения – как источника нутриентов и биологически активных веществ, способного повышать пищевую ценность и функциональные свойства продуктов. Обобщение таких данных позволяет уточнить место крапивы двудомной среди нетрадиционных растительных ингредиентов и выявить наиболее перспективные направления ее дальнейшего использования в технологиях функциональных пищевых продуктов (Devkota et al., 2022; Касумова и др., 2026; Коломиец и др., 2025).

Целью настоящего обзора является анализ современного состояния исследований, посвященных химическому составу крапивы двудомной *Urtica dioica* L., ее пищевому применению и технологическим перспективам использования в составе продуктов с повышенной пищевой ценностью.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: 1) проанализировать литературные данные о пищевой и фитохимической ценности крапивы двудомной, включая содержание белка, пищевых волокон, витаминов, минеральных веществ, каротиноидов и фенольных соединений; 2) обобщить сведения о составе основных биологически активных компонентов крапивы и их значении для формирования функциональных свойств пищевых продуктов; 3) рассмотреть опубликованные исследования, касающиеся основных направлений пищевого использования *Urtica dioica*, и оценить, в каких продуктовых категориях крапива применяется наиболее активно; 4) выявить технологические и нутрициологические эффекты внесения крапивы в пищевые системы.

Материалы и методы

Настоящее исследование выполнено как обзор предметного поля с элементами библиометрического и тематического анализа литературы. Методический подход был ориентирован на принципы прозрачного отбора и систематизации источников с последующим картированием структуры исследовательского поля. Описание поисковой стратегии, отбора и систематизации источников структурировано с учетом отдельных рекомендаций PRISMA-ScR, адаптированных к задачам обзорного и библиометрического исследования.

Поиск релевантных источников литературы проводили за период выхода публикаций 2005–2026 гг. с помощью специализированных поисковых платформ Google Scholar и Semantic Scholar. В первичный массив включали публикации, посвященные *Urtica dioica* L. как источнику функциональных ингредиентов для пищевых систем, включая исследования химического состава крапивы двудомной, ее биологически активных компонентов, пищевого применения, а также работы, связанные с технологическими аспектами переработки и использования крапивы в составе пищевых продуктов.

Для повышения релевантности выдачи при поиске публикаций по пищевому применению крапивы применили целевой расширенный запрос: intitle:"Urtica dioica" AND (food OR "food product*" OR "food products" OR edible OR culinary OR nutrition OR fortification OR enrichment OR formulation OR bakery OR baking OR bread OR pasta OR beverage OR напиток* OR пищев* OR "пищевые продукт*" OR съедобн*

OR кулинар* OR питательн* OR "пищевая ценность" OR обогащен* OR фортификац* OR рецептур* OR хлеб OR выпечк* OR макарон* OR паста OR напиток*) -(seed OR seeds OR seedling* OR "seed oil" OR "seed extract" OR семена OR семен*) -feed -breeding.

Данный запрос был направлен на отбор работ, в названиях которых прямо фигурирует объект исследования *Urtica dioica*, а в содержании представлены признаки пищевого, нутрициологического или технологического контекста. Одновременно из поиска исключали публикации, посвященные кормовому использованию и селекции.

Отбор источников осуществляли в несколько этапов. На первом этапе формировали первичный корпус публикаций по тематически релевантным ключевым словам и целевым поисковым формулам. На втором этапе проводили финальную селекцию источников, исключая дублирующиеся, нерелевантные и библиографически неполные записи. Для управления библиографией использовали пакет программ Zotero, в котором выполняли дедупликацию, унификацию описаний и дополнение библиографической информации.

В итоговый массив для анализа было включено 327 источников, из которых 133 публикации относились непосредственно к использованию крапивы двудомной в пищевой промышленности. Эта выборка рассматривалась как основа для анализа пищевого применения растения, тогда как полный массив использовался для характеристики общего предметного поля.

Для анализа структуры предметного поля библиографические данные экспортировали в программный пакет VOSviewer. Картирование выполняли по текстовому наполнению названий и аннотаций публикаций, что позволило визуализировать частоту встречаемости терминов, установить взаимосвязи между ними и выделить устойчивые тематические кластеры внутри исследовательского поля. Для унификации и обработки в пакете Zotero аннотации для источников на русском языке заменяли на англоязычные версии. Использование VOSviewer как инструмента визуализации и интерпретации структуры предметного поля соответствует современным подходам, применяемым в обзорных работах (Bolshakova et al., 2025; Yadav et al., 2024).

Для унификации терминов, усиления эффекта кластеризации был составлен тезаурус синонимов слов, идентифицируемых VOSviewer при анализе названий и аннотаций статей.

При последующем аналитическом обзоре особое внимание уделяли следующим блокам: химический состав крапивы двудомной, содержание макро- и микронутриентов, наличие фенольных соединений и каротиноидов, основные категории пищевых продуктов с добавлением крапивы, а также технологические эффекты ее внесения в рецептуры.

Результаты и обсуждение

Картирование предметного поля исследований крапивы двудомной Urtica dioica в аспекте пищевого применения

Для выявления структуры современных исследований *Urtica dioica* построена карта совместной встречаемости (рис. 1) терминов по названиям и аннотациям публикаций, отобранных в библиографический массив. Центральное положение занимает термин *dioica*, являющийся видовым эпитетом в латинском названии крапивы двудомной *Urtica dioica*. Термин связан с несколькими крупными исследовательскими доменами, что указывает на междисциплинарный характер работ по крапиве двудомной, которая одновременно рассматривается как источник биологически активных веществ, объект фармакологических исследований и функциональный ингредиент пищевых продуктов. Размер узлов отражает частоту встречаемости терминов.

Наиболее выраженным является кластер, связанный с химическим составом и биологически активными компонентами. В него входят термины, относящиеся к фенольным соединениям, флавоноидам, антиоксидантной активности, спектрофотометрическим и экстракционным методам, а также к антимикробным свойствам. Наличие в этом сегменте терминов *total phenol*, *flavonoid content*, *DPPH*, *antioxidant capacity*, *ethanol*, *methanol* (в переводе: общее содержание фенолов, содержание флавоноидов, дифенил-пикрилгидразил, антиоксидантная способность, этанол, метанол) и других понятий показывает, что значительная часть работ сосредоточена на аналитической характеристике сырья и экстрактов, а также на доказательстве их функционального потенциала.

Второй крупный блок формируют исследования фармакологической и биомедицинской направленности. Здесь доминируют термины *treatment*, *rat*, *diabetes*, *oxidative stress*, *inflammation*, *blood glucose*, *cognitive performance*, *clinical study*, *anti inflammatory* (лечение, крыса, диабет, окислительный стресс, воспаление, уровень глюкозы в крови, когнитивные функции, клиническое исследование, противовоспалительное средство) и близкие к ним. Такая конфигурация карты показывает, что крапива двудомная широко изучается в моделях метаболических нарушений, воспалительных состояний и окислительного стресса, а также в контексте оценки механизмов действия и терапевтической эффективности.

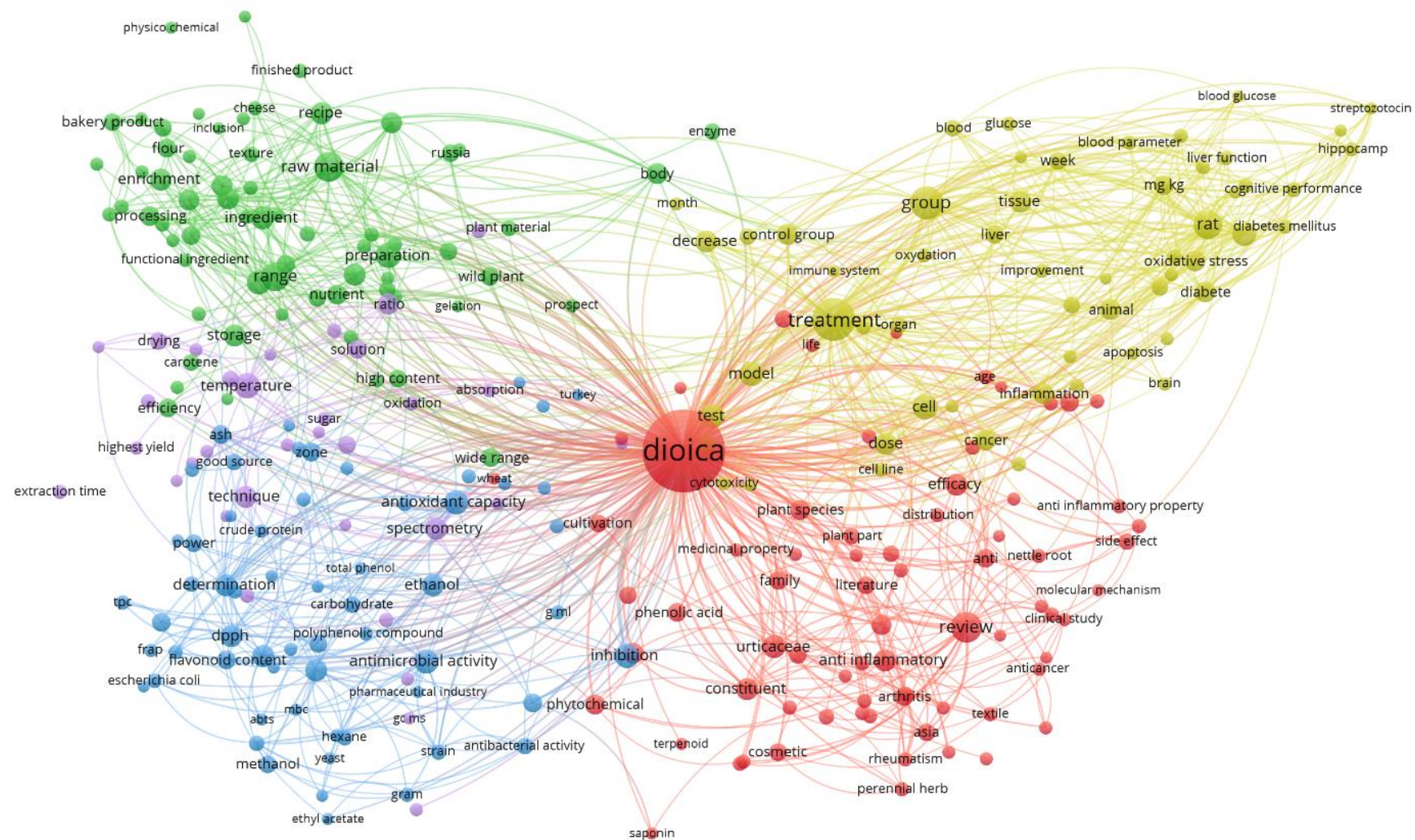


Рис. 1. Карта совместной встречаемости терминов в публикациях о крапиве двудомной *Urtica dioica*, отражающая основные тематические кластеры исследований
 Fig. 1. Co-occurrence network map of terms in publications on stinging nettle (*Urtica dioica*), showing the main thematic research clusters

Отдельный кластер образуют работы по пищевому применению крапивы. В нем группируются термины *bakery product*, *recipe*, *ingredient*, *enrichment*, *raw material*, *functional ingredient*, *processing*, *texture*, *finished product* (хлебобулочное изделие, рецепт, ингредиент, обогащение, сырье, функциональный ингредиент, обработка, текстура, готовый продукт). Их совокупность показывает, что в пищевой отрасли *Urtica dioica* рассматривается прежде всего как обогащающий компонент рецептур, способный повышать пищевую и биологическую ценность продукта. При этом основная часть работ сосредоточена на традиционных продуктах (хлебобулочных, макаронных, кондитерских и других функциональных продуктах). По результатам проведенного обзора использование крапивы в пищевой промышленности пока находится на ранней стадии развития и в основном ограничивается именно таким направлением.

Химический состав крапивы двудомной в аспекте ее пищевого применения

Обобщенные литературные данные по химическому составу крапивы двудомной в зависимости от морфологической части растения (табл. 1) позволяют оценить ее нутрициологический потенциал как ингредиента пищевых продуктов. Данные таблицы показывают, что наиболее концентрированными по основным нутриентам являются высушенные формы и порошки. Содержание белка в сухих образцах находится в широком диапазоне (2,5–33,8 %) (*Adhikari et al.*, 2016; *Kregiel et al.*, 2018; *Tarasevičienė et al.*, 2023; *Upton*, 2013), при этом наиболее высокие значения характерны для сухого порошка из травы крапивы (24–33,8 %) (*Adhikari et al.*, 2016) и листьев (14,5–30 %) (*Kregiel et al.*, 2018; *Tarasevičienė et al.*, 2023; *Жилкина и др.*, 2017). Стебли и корни содержат меньше белка, однако и они могут рассматриваться как дополнительный источник азотистых веществ. По содержанию пищевых волокон особенно выделяются стебли и корни: для стеблей приведены значения 27,7–34,9 %, для корней – около 33,9 % (*Ушанова и др.*, 2001), тогда как листья и сухие порошкообразные формы также содержат значимые количества пищевых волокон. Свежая крапива, напротив, характеризуется существенно более низкими концентрациями белка, пищевых волокон, жира и углеводов, что закономерно связано с высоким содержанием влаги.

Витаминно-минеральный профиль крапивы двудомной дополнительно подтверждает ее высокую нутрициологическую значимость, причем по ряду компонентов растение может рассматриваться как особенно ценный источник в расчете на суточную потребность. Наиболее выражено выделяется витамин K1: для листьев в пересчете на сухое вещество приведено содержание около 3 мг/100 г (*Жилкина и др.*, 2017), что значительно превышает физиологическую потребность взрослого человека. Существенный интерес представляет и кальций: в свежем сырье его содержание составляет 323–481 мг/100 г (*Bhusal et al.*, 2022; *Shonte*, 2017), а в высушенных листьях и порошкообразных формах его концентрация значительно возрастает (*Adhikari et al.*, 2016; *Kregiel et al.*, 2018). Дополнительный вклад в пищевую ценность вносят магний и калий; среди микроэлементов особенно следует выделить железо, содержание которого в свежем сырье достигает 1,6–2,5 мг/100 г (*Bhusal et al.*, 2022; *Shonte*, 2017) и заметно возрастает в сухих формах (*Adhikari et al.*, 2016). Кроме того, в листьях и свежем сырье присутствуют цинк, медь, марганец, кобальт, никель и хром (*Bhusal et al.*, 2022; *Kregiel et al.*, 2018; *Shonte*, 2017; *Жилкина и др.*, 2017; *Карпухин и др.*, 2019), что позволяет рассматривать крапиву как многокомпонентный источник минеральных веществ. Среди витаминных компонентов, помимо филлохинона, выделяются витамины С и А, рибофлавин, тиамин, ниацин и холин (*Bhusal et al.*, 2022; *Shonte*, 2017; *Жилкина и др.*, 2017); наиболее выраженный витаминный потенциал характерен прежде всего для листового сырья. Наряду с макро- и микронутриентами, для крапивы двудомной характерно присутствие фенолгликозидов, органических кислот и полифенольных соединений, что дополнительно усиливает ее функциональную значимость.

Фенольные соединения крапивы двудомной *Urtica dioica* L. представлены преимущественно флавоноидами и фенольными кислотами, причем наибольшее значение для пищевых применений имеют листья. В их составе наиболее часто идентифицируют рутин, кверцетин и его гликозиды, кемпферол, изорамнетин, мирицетин, апигенин, лютеолин, катехин и эпикатехин; среди фенольных кислот – галловую, протокатеховую, ванилиновую, сиреневую, кофейную, хлорогеновую, *p*-кумаровую, феруловую и синаповую кислоты (*Devkota et al.*, 2022; *Đurović et al.*, 2024). В листьях флавоноидная фракция, как правило, количественно преобладает над фенолкарбоновыми кислотами, тогда как для корней соотношение этих групп более выровнено; сезон заготовки также существенен, поскольку весенние листья содержат больше полифенолов, чем сырье позднего сбора (*Kőszegi et al.*, 2023).

По количественным показателям листья крапивы характеризуются высоким накоплением фенольных веществ. Для порошка из высушенных листьев приведено общее содержание фенольных соединений на уровне 129 мг GAE/г (*Adhikari et al.*, 2016), при этом современные исследования порошка листьев, полученного после сушки при 50 ± 5 °C, подтверждают высокое содержание как суммарных фенолов, так и флавоноидов (*Devkota et al.*, 2022; *Sahal et al.*, 2025). В совокупности эти данные позволяют рассматривать крапиву как концентрированный источник фенольных антиоксидантов растительного происхождения.

Антиоксидантная активность *U. dioica* подтверждена в широком спектре химических тестов, включая модели ингибирования перекисного окисления липидов. В обзоре (*Jaiswal et al.*, 2022) для гидроалкогольного экстракта надземной части приведено значение 88,33 в DPPH-тесте. Для метанольного экстракта листьев

ингибирование перекисного окисления линолевой кислоты достигало 62,34 %, а в ряде работ антиоксидантный эффект экстрактов крапивы был сопоставим с активностью референтных антиоксидантов или превышал ее (Devkota et al., 2022; Jaiswal et al., 2022).

Таблица 1. Химический состав крапивы двудомной
Table 1. Chemical composition of stinging nettle (*Urtica dioica* L.)

Показатель	Высушенная крапива, порошок из листьев	Листья	Стебли	Корни	Свежая пищевая крапива
Белок, %	24,0–33,8	14,5–30,0	3,0–14,5	3,31–13,7	5,0–6,0
Пищевые волокна, %	8,37–15,0	9,08–20,0	27,7–34,9	33,9	0,6
Жир, %	3,33–9,1	2,6–2,9	4,5	1,7	0,6–1,2
Углеводы, %	23,8–37,4	25	2,2	5,2	2,2–7,1
Зола, %	16,21–17,75	н/д	н/д	н/д	н/д
Витамин С, мг/100 г СВ	83,0	3,12–60	2,68	2,67	н/д
Витамин К ₁ (филлохинон), мг/100 г СВ	н/д	3,0	н/д	Следы	н/д
Витамин А, мг/кг	н/д	870,0	н/д	н/д	0,6
Витамин В ₁ (тиамин), мг/кг	н/д	10,0	н/д	н/д	н/д
Витамин В ₂ (рибофлавин), мг/кг	н/д	н/д	н/д	н/д	0,2
Витамин В ₃ , мг/кг	н/д	н/д	н/д	н/д	4,0
Холин, мг/кг	н/д	н/д	н/д	н/д	17,4
Витамин Е, мг/кг	н/д	40,0	н/д	н/д	н/д
Каротиноиды, мг/г СВ	3,497	3,04–4,8	н/д	н/д	н/д
Кальций, %	0,29–3,52	0,8–5,09	0,76–1,42	0,61–0,92	0,32–0,48
Фосфор, %	0,8	0,05	н/д	н/д	н/д
Калий, %	0,2	0,532–3,42	н/д	н/д	0,334
Натрий, %	н/д	0,016–0,4	н/д	н/д	н/д
Магний, мг/кг	1 681,3	1 750–10 000	н/д	н/д	570–1 040
Железо, мг/кг	2,6–227,9	20–300	н/д	н/д	1,6–2,5
Цинк, мг/кг	0,6–2,9	0,5–30	н/д	н/д	3,0–5,0
Медь, мг/кг	1,94	0,08–17,47	н/д	н/д	0,1
Никель, мг/кг	1,05	1,9–6,7	н/д	н/д	н/д
Марганец, мг/кг	0,4–36,8	0,032–17,17	н/д	н/д	0,4–0,8
Хром, мг/кг	0,007	0,31	н/д	н/д	н/д
Кобальт, мг/кг	н/д	0,013–0,21	0,1–0,18	0,08–0,16	н/д
Полифенольные соединения, GAE/г	75,08–128,75	н/д	н/д	н/д	н/д

Примечание. Обозначение "н/д" показывает, что данные в использованных источниках отсутствуют или показатель не был приведен.

Сушка оказывает существенное влияние на фенольный профиль и антиоксидантную активность крапивы. По данным обзорных и экспериментальных работ, характер этих изменений определяется способом дегидратации (Jaiswal et al., 2022). Порошок из листьев, полученный после контролируемой сушки при 50 ± 5 °C, сохранял высокий уровень фенольных соединений и выраженную антиоксидантную активность по DPPH и FRAP, что подтверждает технологическую перспективность дегидратированного сырья (Sahal et al., 2025).

Структура исследований пищевого применения крапивы двудомной

Картирование публикаций, посвященных пищевому применению *Urtica dioica*, показывает, что данное направление формируется вокруг нескольких тесно связанных тематических блоков. На карте (рис. 2) выделяются три основных кластера. Первый объединяет исследования, связанные с рецептурным использованием крапивы в продуктах на зерновой основе; в нем доминируют термины *bread*, *flour*, *pasta*, *fiber*, *iron*, *mineral*, *carotene*, *formulation* (хлеб, мука, макароны, клетчатка, железо, минерал, каротин, рецептура). Такая структура указывает на то, что наиболее разработанным направлением является введение крапивы в хлебобулочные и макаронные изделия как источника пищевых волокон, минеральных веществ и каротиноидов.

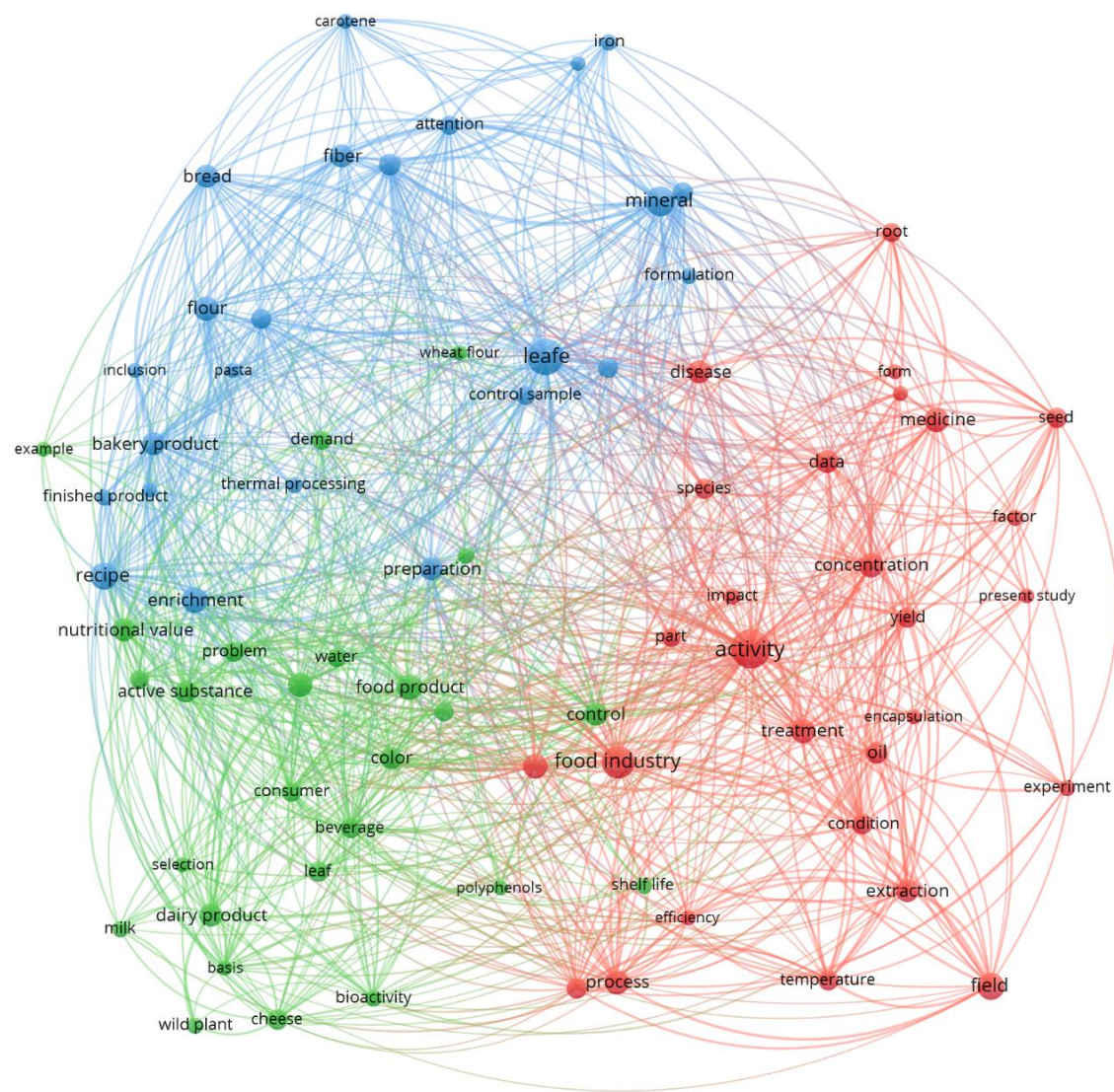


Рис. 2. Карта совместной встречаемости в публикациях терминов, касающихся пищевого применения *Urtica dioica*
 Fig. 2. Co-occurrence map of terms in publications on the food applications of *Urtica dioica*

Второй кластер связан с более широким контекстом пищевых систем и готовых продуктов. В нем группируются термины *food product*, *nutritional value*, *active substance*, *enrichment*, *recipe*, *consumer* (пищевой продукт, пищевая ценность, действующее вещество, обогащение, рецепт, потребитель), а также *milk*, *dairy product*, *cheese*, *beverage* (молоко, молочные продукты, сыр, напитки). Это показывает, что крапива в пищевых исследованиях рассматривается как функциональный ингредиент для различных категорий продукции, включая основанные на крахмалсодержащем сырье, молочные системы и напитки. При этом узлы *food product*, *nutritional value* и *enrichment* (пищевой продукт, пищевая ценность и обогащение) занимают заметное положение, что отражает преобладание работ, ориентированных на повышение пищевой ценности и функциональных свойств продукта.

Третий кластер формируют термины, относящиеся к технологической переработке и оценке биологической активности: *activity*, *food industry*, *process*, *extraction*, *treatment*, *condition*, *temperature*, *yield*, *encapsulation*, *shelf life* (активность, пищевая промышленность, процесс, экстракция, обработка, состояние, температура, выход, инкапсуляция, срок годности). Наличие этих понятий показывает, что часть исследований сосредоточена на способах получения ингредиентов из крапивы, выборе технологических условий переработки и сохранении функциональных компонентов в готовой продукции. Вместе с тем на карте эти термины тесно связаны с узлами *medicine*, *disease*, *root* и *seed* (лекарство, болезнь, корень и семена), что указывает на сохраняющееся влияние фармакологического дискурса на пищевые исследования и перенос подходов из медицины и фитохимии в область пищевых технологий. Показательно, что одним из центральных узлов карты выступает термин *leaf* (лист), что подтверждает ведущую роль листьев крапивы как основного объекта пищевого использования.

Карта плотности терминов (рис. 3) демонстрирует, что наибольшая концентрация публикаций по пищевому использованию *Urtica dioica* связана с листьями крапивы, рецептурным обогащением продуктов, пищевыми волокнами, минеральными веществами и биологической активностью.

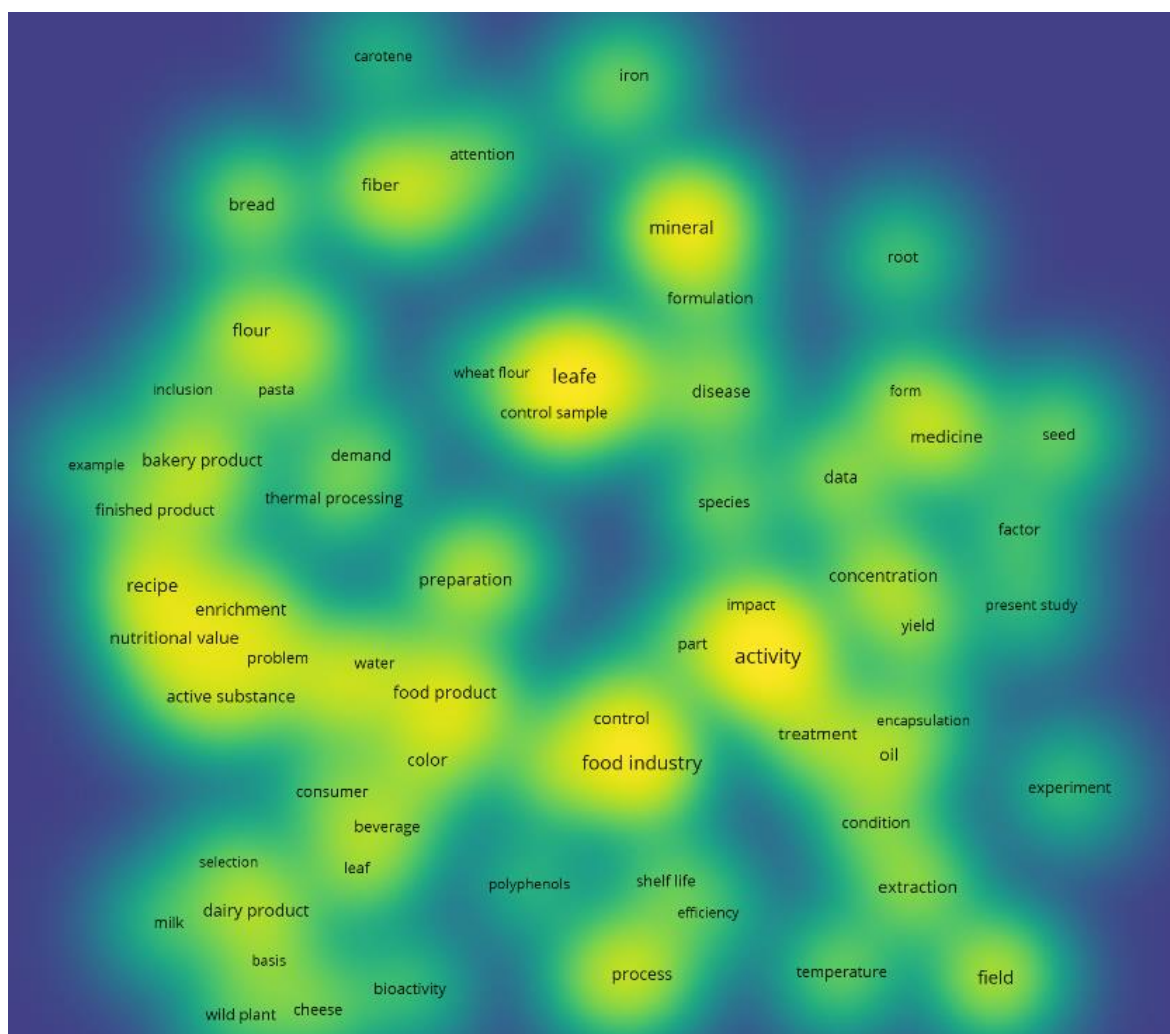


Рис. 3. Плотностная карта терминов предметного поля, касающихся технологии использования *Urtica dioica* в пищевой промышленности
Fig. 3. Term density map of the research field concerning the use of *Urtica dioica* in the food industry

Технологические направления использования крапивы двудомной в пищевых продуктах

Достаточно проработанным направлением использования крапивы двудомной является хлебопекарная отрасль. При этом отмечена общая тенденция: добавление крапивы, особенно листового сырья, повышает пищевую и функциональную ценность хлеба за счет роста содержания пищевых волокон, минеральных веществ и антиоксидантных компонентов. Но увеличение дозировки обычно сопровождается ухудшением технологических и органолептических характеристик, прежде всего снижением объема и изменением структуры мякиша. Наиболее сбалансированные результаты достигаются при умеренных уровнях внесения, а также при использовании настоев и экстрактов, которые в ряде случаев оказываются технологически предпочтительнее грубодисперсного порошка листьев. В этой категории крапива используется преимущественно в переработанном виде, в основном как мука из высушенных листьев, реже в виде настоев и экстрактов листьев. Наиболее типичным подходом является частичная замена пшеничной муки листовым порошком. Например, порошок листьев крапивы вводили в тесто на уровнях 2, 4 и 6 % (Man et al., 2019). Во всех вариантах отмечено увеличение содержания белка, пищевых волокон, однако по мере роста дозировки снижался удельный объем хлеба. При этом образцы оставались приемлемыми по сенсорным и физико-химическим показателям. В похожей работе (Chochkov et al., 2025) при замене 2, 4 и 6 % пшеничной муки крапивной мукой водопоглощение теста возрастало с 62,4 до 63,3 %, объем подового хлеба уменьшался с 820 мл в контроле до 490 мл, т. е. максимально на 40,2 %, а объем формового хлеба – с 1 512 до 1 030 мл. Сенсорная оценка показала, что образец с 2 % крапивной муки был наиболее близок к контролю, тогда как при 4 и 6 % отчетливо снижались показатели внешнего вида, пористости и вкуса. Оценка вкуса уменьшалась с 8 баллов у контроля до 7, 3 и 2 баллов при добавке 2, 4 и 6 % соответственно. Одновременно функциональная ценность хлеба возрастала пропорционально дозировке крапивной муки: содержание флавоноидов увеличивалось с 0,12 до 0,23 мг QE/г, суммарных фенолов – с 0,63 до 1,18 мг GAE/г, т. е. максимально на 87,3 %, антиоксидантная активность по DPPH – с 0,42 до 1,02 ммоль TE/г, или в 2,4 раза. В ряде работ крапиву вводили не в виде порошка, а как жидкую фазу (в виде экстракта), что позволяло смягчить отрицательное влияние растительного сырья на структуру теста. Например, настой крапивы вносили в рецептуру в концентрациях 10, 20, 30 и 40 мг/мл при заваривании части муки (Wójcik et al., 2021). Увеличение дозировки сопровождалось снижением объема буханок, однако варианты с 10 и 20 мг/мл получили наивысшие оценки общей приемлемости; кроме того, применение заварного способа положительно влияло на упругость мякиша, а при дозировках до 20 мг/мл – и на его твердость. Еще более показателен пример работы (Đurović et al., 2020), где сравнивали хлеб с листьями крапивы и хлеб с их экстрактом: добавка порошка листьев ухудшала качество хлеба, тогда как экстракт, напротив, улучшал его, что было подтверждено сенсорной оценкой. В исследовании (Maietti et al., 2021) введение в тесто 100 г замороженных измельченных листьев крапивы на 1 кг муки сопровождалось выраженным улучшением химического состава готового продукта: содержание пищевых волокон увеличивалось с 0,53 до 1,22 г/100 г, кальция – с 126 до 559 мкг/г (примерно в 4,4 раза), меди – с 2,35 до 16,51 мкг/г (примерно в 7 раз), железа – с 11,77 до 15,26 мкг/г (на 29,7 %). Одновременно усиливались функциональные свойства хлеба: суммарное содержание фенольных соединений повышалось с 372 до 597 мкг GAE/г (на 60,5 %), антиоксидантная активность – с 0,53 до 0,83 мг TE/г (на 56,6 %), содержание лютеина – с 1,46 до 3,97 мкг/г (в 2,7 раза), а β -каротин – с 0,41 до 0,72 мкг/г (на 75,6 %). Также показано, что в ходе хлебопечения содержание фенольных соединений в обогащенном продукте возрастало с 706 мкг GAE/г на стадии замеса до 835 мкг GAE/г после выпечки, а антиоксидантная активность – с 0,80 до 1,16 мг TE/г, что указывает на дополнительное раскрытие антиоксидантного потенциала системы в процессе ферментации и выпечки.

Отмечается (Чернявских и др., 2019), что порошок крапивы положительно влияет на хлебопекарные свойства муки, включая число падения и вязкость теста, а для пшеничного хлеба оптимальным считается внесение 0,5–3 % порошка крапивы, обеспечивающее хорошие хлебопекарные и функционально-технологические свойства полуфабриката и готового продукта. Там же обобщены данные о том, что при производстве ржано-пшеничного хлеба целесообразно использовать 1,5 % порошка из надземных частей крапивы для обогащения продукта микронутриентами, пектином и витаминами и одновременного улучшения технологических свойств муки. Описан способ получения обогащающей добавки из листьев крапивы и приведены результаты анализа функционального хлеба на экстракте листьев крапивы в сравнении с контролем (Иванова и др., 2025).

Крапива рассматривается как один из компонентов комплексного обогащения макаронных изделий функционального назначения (Мелешкина и др., 2021). Так, в исследовании (Krawęcka et al., 2021) тальятелле из твердой пшеницы получали при частичной замене семолы лиофилизированной крапивой (до 5 %). Такое обогащение приводило к статистически значимому повышению содержания минеральных веществ, прежде всего кальция, железа, калия и магния, а также хлорофиллов, каротиноидов и пищевых волокон. При этом минимальные значения расчетного гликемического индекса были отмечены для образца с 3 % добавки. В работе (Marchetti et al., 2018) крапиву вводили в яичную пасту как источник лютеина и β -каротина. Акцент исследования был сделан на биодоступности каротиноидов; было показано, что пищевая матрица существенно влияет на их высвобождение в процессе пищеварения, а у обогащенной пасты максимальная

биодоступность наблюдалась уже на ранних этапах колонической ферментации. Более подробно технологические последствия внесения разных морфологических частей растения показаны в работе (Kömrüci et al., 2023), где в лапшу вводили порошок крапивы в количестве до 8 % взамен части пшеничной муки. Даже минимальная дозировка (2 %) повышала содержание свободных, связанных и суммарных фенольных соединений, а при уровнях 4 % и выше возрастала антиоксидантная активность, однако одновременно уменьшались водопоглощение и увеличение объема при варке, а также существенно изменялись цветковые характеристики продукта. В работе по разработке макаронных изделий с кукурузной мукой вариант с добавлением 2 % *Urtica dioica* был признан лучшим по органолептическим и физико-химическим показателям (Ахлан и др., 2020).

В группе кондитерских продуктов *Urtica dioica* используется в нескольких технологических формах: как порошок из листьев, как экстракты, а также как порошок и экстракт семян. Крапивные экстракты вводили в шоколад в лиофилизированной и концентрированной формах (Belščak-Cvitanović et al., 2015). В обоих вариантах обогащение сопровождалось увеличением содержания полифенолов, хлорогеновой кислоты, производных флавоноидов и антиоксидантной активности, причем более выраженный эффект обеспечивал лиофилизированный экстракт. В печенье, напротив, существенную роль играет не только экстракт, но и цельное измельченное сырье. Показано, что для обогащения печенья более эффективной формой внесения являлась мука из семян крапивы, которую вносили из расчета 150 г муки из семян крапивы на 350 г пшеничной муки (Mitrović et al., 2022). По результатам выпечки по сравнению с контролем содержание свободных фенольных соединений в образце с мукой из семян крапивы было выше в 2,1 раза, а связанных фенольных соединений – в 2,5 раза.

Мука из листьев крапивы двудомной добавлялась в тесто для кукурузного печенья в количестве до 20 % (Tanyitiku et al., 2024); отмечено увеличение белка с 6,44 до 21,52 %. В результате теста по перевариванию крахмала *in vitro* общее содержание фенольных соединений и антиоксидантная активность выросли примерно в 27 и 7 раз соответственно, а расчетный гликемический индекс снизился с 48,60 в контроле до 33,18 %.

Крапивную листовую муку применяли как функциональный ингредиент в безглютеновых рисовых вафлях (Tanyitiku et al., 2025), что повышало содержание белка, пищевых волокон, фенольных соединений, флавоноидов и антиоксидантную активность продукта. В работе (Tarkanyi et al., 2025) крапива также рассматривается как функциональный ингредиент мучных изделий, в частности несладких кексов, ориентированный не только на повышение пищевой ценности, но и на расширение ассортимента продуктов с добавленной биологической ценностью. Для бисквитных полуфабрикатов показательна работа (Масенкова, 2023), в которой обоснована возможность использования мелкодисперсного порошка крапивы одновременно как натурального красителя и как источника биологически активных веществ.

В молочных системах *Urtica dioica* используется в нескольких направлениях: растительное сырье для обогащения творожных и молочно-белковых продуктов; источник коагулирующих ферментов и экстрактов для сыроделия; функциональная добавка в мороженое. В исследованиях по творожным и сырным продуктам (Лупинская и др., 2015; Саженова, 2017; Саженова и др., 2016) использование сырья крапивы обосновано как способ формирования функциональных свойств продукта, повышения содержания β-каротина, улучшения аминокислотного сора. Проведены исследования по введению в рецептуру мороженого сока крапивы в концентрациях до 25 % (Singh et al., 2025).

Для ферментированных напитков технологически проработанный пример дает исследование, где экстракт крапивы инкапсулировали в наноэмульсию и вносили в айран в дозировках 5 и 10 % (Amiri et al., 2021). Размер капель полученной наноэмульсии составил 404,6 нм, эффективность инкапсуляции – 58,04 %. После 21 суток хранения образец с 10 % наноэмульсии характеризовался наибольшими значениями фенольных соединений (30,3 мг GAE/100 мл), DPPH-активности (50 %), фазовой стабильности (64 %).

Отдельный блок составляют работы по сыроделию. В исследовании (Михайлова и др., 2020, 2021) показано, что водный экстракт листьев крапивы, содержащий ферменты и органические кислоты, может использоваться как натуральный коагулянт. По органолептическим показателям мягкий сыр с экстрактом крапивы практически не отличался от сыра, полученного сычужным ферментом, хотя относительный выход продукта был ниже. В работе (Bouazizi et al., 2022) листья крапивы исследуются как источник протеазы для свертывания верблюжьего молока. В аспекте повышения хранимости сыров экстракт крапивы вводили в состав хитозановой биоразлагаемой пленки, применяемой в качестве активного разделителя между ломтиками сыра при вакуумной упаковке (Flórez et al., 2023). Пленка предназначалась для технологического разделения нарезанного сыра и для локальной антиоксидантной защиты в процессе хранения. Авторы показали, что за 45 суток холодильного хранения при 5 °C использование пленки с экстрактом крапивы обеспечивало выраженное торможение липидного окисления; общее уменьшение интенсивности окисления по сравнению с контролем достигало 56 %.

В работах по технологии напитков *Urtica dioica* представлена как растительный компонент для травяных чаев (Семенова, 2017), ферментированных напитков (Крукович и др., 2021) и безалкогольных напитков антиоксидантной направленности (Чугунова и др., 2019).

В мясных системах *Urtica dioica* используется главным образом в качестве природного антиоксиданта и антимикробного компонента, а также функциональной растительной добавки в рубленых полуфабрикатах. Исследовано влияние водного экстракта крапивы или высушенных листьев (Khanloo et al., 2020) на хранимость вареных свиных колбас. Наиболее выраженный эффект получен при внесении 600 мг/кг экстракта; в результате снижалось содержание вторичных продуктов окисления липидов, лучше сохранялась окраска при хранении, а по результатам сенсорной оценки они превосходили остальные варианты. В похожем исследовании лиофилизированный водный экстракт крапивы вводили в вакуум-упакованные говяжьи стейки в концентрациях до 450 мг/кг (Bagheri et al., 2021). С увеличением дозировки экстракта уменьшалось содержание продуктов липидного окисления, снижалась численность психротрофной микрофлоры, бактерий рода *Pseudomonas*, представителей *Enterobacteriaceae* и молочнокислых бактерий. Для ферментированных мясных продуктов отмечено исследование, в котором в ходе созревания суджук с крапивой установлено, что *Urtica dioica* эффективнее других антиоксидантов снижала концентрации гистамина и путресцина (Karabacak et al., 2008).

Для рубленых изделий отмечена работа (Bagheri et al., 2021), где эфирное масло крапивы включали в комбинированную систему с хитозаном и камедью семян базилика. Такие композиции снижали окислительную и микробиологическую порчу. При разработке функциональных рубленых полуфабрикатов из мяса птицы установлено, что лучшие сенсорные свойства имели образцы с 3 % льняной муки и 1,5 % крапивы (Шарипова и др., 2016).

Заключение

Проведенный обзор показывает, что *Urtica dioica* следует рассматривать не только как традиционное дикорастущее и лекарственное растение, но и как перспективный источник нутриентов и биологически активных веществ для пищевой промышленности. Современные обзорные работы указывают на высокую пищевую ценность крапивы двудомной, обусловленную содержанием белка, пищевых волокон, витаминов, минеральных веществ, каротиноидов, фенольных соединений и других фитохимических компонентов, определяющих ее нутрициологический и антиоксидантный потенциал (Bhusal et al., 2022; Devkota et al., 2022; Jan et al., 2017). В более широком контексте род *Urtica* рассматривается в качестве малоизученного, но биохимически и прикладно значимого таксона, обладающего существенным потенциалом для дальнейшего расширения направлений использования, в том числе в пищевой сфере (Коломиец и др., 2025).

Библиометрический анализ публикаций подтвердил, что исследования крапивы двудомной носят междисциплинарный характер. Наряду с массивом работ, посвященных химическому составу, биологически активным веществам и фармакологическим эффектам, сформировалось самостоятельное технологическое направление, в котором *Urtica dioica* изучается как ингредиент для повышения пищевой ценности и функциональных свойств продуктов. При этом наиболее разработанными остаются хлебобулочные, макаронные, кондитерские, молочные, мясные системы и напитки, тогда как более сложные технологические решения и новые продуктовые форматы изучены значительно слабее. Таким образом, современное состояние предметного поля позволяет говорить о переходе от фрагментарного использования крапивы в виде растительной добавки к ее более осмысленному рассмотрению в качестве функционального ингредиента для различных категорий пищевой продукции.

Анализ опубликованных данных показывает, что включение крапивы двудомной в рецептуры пищевых продуктов в большинстве случаев сопровождается повышением содержания минеральных веществ, пищевых волокон, каротиноидов, фенольных соединений и усилением антиоксидантной активности. Вместе с тем выраженность положительного эффекта зависит от формы внесения сырья, дозировки, особенностей продуктовой матрицы и режима технологической обработки. Для большинства продуктовых категорий характерна общая закономерность: умеренные дозировки и технологически адаптированные формы крапивы (экстракты, настои и тонкодисперсные порошки) чаще обеспечивают наиболее благоприятный баланс между ростом пищевой ценности и сохранением органолептических и структурно-механических свойств продукта. Следовательно, дальнейшее развитие пищевого применения *Urtica dioica* должно быть связано не только с констатацией ее высокой биологической ценности, но и с технологической оптимизацией способов включения этого сырья в конкретные пищевые системы.

Принципиально важно, что перспективы промышленного использования крапивы двудомной определяются не только ее химическим составом, но и стабильностью сырьевой базы, безопасностью и воспроизводимостью качества. Дикорастущая крапива, особенно происходящая с антропогенно нарушенных территорий, может характеризоваться нестабильным составом и способностью накапливать тяжелые металлы, что делает необходимыми контролируемое возделывание, селекционную работу и стандартизацию сырья (Чернявских и др., 2019). Сходные выводы представлены и в межотраслевых обзорах по проблемам циркулярной биоэкономики (Tofănică et al., 2024). Тем самым проблема включения крапивы *Urtica dioica* в пищевые технологии приобретает не только технологическое, но и отчетливо выраженное социально-экономическое значение, поскольку связана с обеспечением устойчивой сырьевой базы, безопасности продукции и возможностью формирования новых отечественных цепочек производства функциональных ингредиентов. Крапива двудомная может рассматриваться и как перспективный объект для разработки

пищевых решений, соответствующих задачам продовольственной устойчивости, импортозамещения и развития локальных производственных решений, в том числе арктических территорий.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы FGMP-2026-0012 "Технологии пищевых продуктов, обогащенных крапивой двудомной *Urtica dioica* как дополнительного источника микронутриентов: технические и нутрициологические аспекты".

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Ахлан Т. Б., Жумалиева Г. Е., Мулдабекова Б. Ж. Влияние порошка крапивы двудомной на качественные показатели макаронных изделий // Вестник Алматинского технологического университета. 2020. № 3. С. 52–56. DOI: <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2020-3-52-56>. EDN: PMAFDE.
- Деграф Е. А., Тарабанова Е. В. Биологически активные вещества крапивы двудомной *Urtica dioica* L. // Химия и жизнь : сб. XX Междунар. науч.-практ. студенческой конф., г. Новосибирск, 13 мая 2021 г. Новосибирск, 2021. С. 46–50. EDN: KKSSMG.
- Жилкина В. Ю., Ефимова И. А., Марахова А. И., Донцова О. Н. Изучение качественного и количественного содержания биологически активных веществ в витаминном сборе крапивы и рябины (обзор) // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2017. № 2(19). С. 200–207. EDN: OSXGCL7.
- Иванова Э. С., Родионов Ю. В., Данилин С. И. Производство хлеба на водных экстрактах листьев растений ЦЧР // Наука и образование. 2025. Т. 8, № 2. EDN: CZAKXV.
- Карпунин М. Ю., Юрин А. А., Чусовитина К. А. Использование крапивы двудомной (*Urtica dioica* L.) в фитотерапии // Аграрное образование и наука. 2019. № 4. С. 25. EDN: WPBWEQ.
- Касумова А. А., Алекперов А. Ю. Перспективы использования крапивы при разработке функциональных продуктов питания // Вестник науки. 2026. Т. 1, № 2(95). С. 1030–1048. EDN: YHDBSO.
- Коломиец Н. Э., Танцерева И. Г. Род крапива (*Urtica* L.): малоизученный род с большим потенциалом (обзор) // Химия растительного сырья. 2025. № 2. С. 28–46. DOI: <https://doi.org/10.14258/jscrpm.20250215712>. EDN: IGBXDY.
- Крукович О. В., Масанский С. Л. Управление процессом сбраживания настоя из листьев крапивы двудомной по показателю его редокс-потенциала // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия. 2021. № 1(30). С. 20–30. EDN: KJLEKV.
- Лупинская С. М., Саженова Ю. М. Разработка рецептуры творожного продукта, обогащенного БАВ крапивы и облепихи // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2015. № 4(33). С. 48–53. EDN: UBFOBN.
- Масенкова А. В. Разработка технологии бисквитного полуфабриката на основе натурального красителя – источника биологически активных веществ // Инновационные тенденции развития российской науки : материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, г. Красноярск, 29–31 марта 2023 г. Красноярск, 2023. С. 484–491. EDN: BXXTWM.
- Мелешкина Л. Е., Снегирева А. В., Червякова Н. В. Макароны изделия функционального назначения // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.25712/astu.2072-8921.2021.04.008>. EDN: PUHPSX.
- Михайлова Ю. А., Кравец А. Н. Разработка технологии мягких сыров с коагулянтами растительного природного происхождения // Основы и перспективы органических биотехнологий. 2020. № 4. С. 34–39. EDN: KVBEIW.
- Михайлова Ю. А., Кравец А. Н. Сравнительная оценка технологии и качества мягкого сыра с растительным экстрактом из крапивы // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2021. Т. 7, № 3. С. 43–52. EDN: ASKJXB.
- Саженова Ю. М. Функциональный творожный продукт с крапивой и шиповником // Ползуновский вестник. 2017. № 2. С. 23–27. EDN: ZDDVWZ.
- Саженова Ю. М., Лупинская С. М. Разработка технологии творожного продукта с использованием дикорастущего сырья облепихи и крапивы // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 4(43). С. 76–82. EDN: XELEM.
- Семенова С. А. Перспективы получения травяного чая с добавлением крапивы // Молодой исследователь: от идеи к проекту : материалы I студенческой науч.-практ. конф., г. Йошкар-Ола, 28 апреля 2017 г. Йошкар-Ола, 2017. С. 102–104. EDN: ZUKQGR.
- Ушанова В. М., Лебедева О. И., Репях С. М. Исследование влияния условий произрастания на химический состав крапивы двудомной (*Urtica dioica* L.) // Химия растительного сырья. 2001. № 3. С. 97–104. EDN: HWILUV.

- Чернявских В. И., Думачева Е. В., Думачев Д. В. Мобилизация адаптивного потенциала и вопросы рационального использования биологических ресурсов крапивы (*Urtica dioica* L.) в Белгородской области // II Междунар. науч. конф. "Роль метабономики в совершенствовании биотехнологических средств производства" по направлению "Метабономика и качество жизни", г. Москва, 6–7 июня 2019 г. М., 2019. С. 426–430. EDN: CFFAKW.
- Чугунова О. В., Пастушкова Е. В. Перспективы использования растительного сырья для производства безалкогольных напитков антиоксидантной направленности // Индустрия питания. 2019. Т. 4, № 1. С. 23–33. EDN: AUXXTN.
- Шарипова А. Ф., Канарейкина С. Г., Канарейкин В. И. Влияние льняной муки и крапивы на сенсорные характеристики функциональных рубленых полуфабрикатов из мяса птицы // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 6(62). С. 182–184. EDN: XSLBAL.
- Яцок В. Я., Чалый Г. А., Сошникова О. В. Биологически активные вещества крапивы двудомной // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2006. Т. 14, № 1. С. 25–29. EDN: HYSBZJ.
- Adhikari B. M., Bajracharya A., Shrestha A. K. Comparison of nutritional properties of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) flour with wheat and barley flours // Food Science & Nutrition. 2016. Vol. 4, Iss. 1. P. 119–124. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.259>.
- Amiri Z. R., Nemati A., Tirgarian B., Dehghan B. [et al.]. Influence of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) extract-loaded nano-emulsion on the storage stability and antioxidant attributes of Doogh (Traditional Iranian yoghurt beverage) // Food Measure. 2021. Vol. 15. P. 437–448. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00647-2>.
- Bagheri R., Ariaii P., Motamedzadegan A. Effects of chitosan incorporated with basil seed gum and nettle (*Urtica dioica* L.) essential oil on the quality of beef burger during refrigerated storage // Food Measure. 2021. Vol. 15. P. 256–264. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00628-5>.
- Belščak-Cvitanović A., Komes D., Durgo K., Vojvodić A. [et al.]. Nettle (*Urtica dioica* L.) extracts as functional ingredients for production of chocolates with improved bioactive composition and sensory properties // Journal of Food Science and Technology. 2015. Vol. 52. P. 7723–7734. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1916-y>.
- Bhusal K. K., Magar S. K., Thapa R., Lamsal A. Nutritional and pharmacological importance of stinging nettle (*Urtica dioica* L.): A review // Heliyon. 2022. Vol. 8, Iss. 6. Article number: e09717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09717>.
- Bolshakova E. I., Poklar U. N. Whey in 3D printing: A scoping review // Food Metaengineering. 2025. Vol. 3, Iss. 2. P. 106–132. DOI: <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.88>.
- Bouazizi A., Felfoul I., Attia H., Karoui R. Characterization of nettle leaves (*Urtica dioica* L.) as a novel source of protease for clotting dromedary milk by non-destructive methods // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2022. Vol. 211. Article number: 112312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.112312>.
- Chochkov R., Ivanova P., Zlateva D., Bogdanova M. Rheological and sensory properties and bioactive compounds of wheat dough and bread enriched with nettle (*Urtica dioica* L.) flour // Ukrainian Food Journal. 2025. Vol. 14, Iss. 3. P. 393–405. DOI: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2025-14-3-3>.
- Devkota H. P., Paudel K. R., Khanal S., Baral A. [et al.]. Stinging nettle (*Urtica dioica* L.): Nutritional composition, bioactive compounds, and food functional properties // Molecules. 2022. Vol. 27, Iss. 16. Article number: 5219. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27165219>.
- Durović S., Kojić I., Radić D., Smyatskaya Y. A. [et al.]. Chemical constituents of stinging nettle (*Urtica dioica* L.): A comprehensive review on phenolic and polyphenolic compounds and their bioactivity // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25, Iss. 6. Article number: 3430. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25063430>.
- Durović S., Pavlić B., Šorgić S., Popov S. Chemical composition of stinging nettle leaves obtained by different analytical approaches // Journal of Functional Foods. 2017. Vol. 32. P. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.02.019>.
- Durović S., Vujanović M., Radojković M., Filipović J. [et al.]. The functional food production: Application of stinging nettle leaves and its extracts in the baking of a bread // Food Chemistry. 2020. Vol. 312. Article number: 126091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126091>.
- Flórez M., Vázquez M., Cazón P. Enhancing the quality of Havarti cheese: Chitosan films with nettle *Urtica dioica* L. extract as slice separators to retard lipid oxidation // LWT. 2023. Vol. 189. Article number: 115504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115504>.
- Grauso L., de Falco B., Lanzotti V., Motti R. Stinging nettle, *Urtica dioica* L.: Botanical, phytochemical and pharmacological overview // Phytochemistry Reviews. 2020. Vol. 19. P. 1341–1377. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11101-020-09680-x>.
- Jaiswal V., Lee H.-J. Antioxidant activity of *Urtica dioica*: An important property contributing to multiple biological activities // Antioxidants. 2022. Vol. 11, Iss. 12. Article number: 2494. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11122494>.

- Jan K. N., Zarafshan K., Singh S. Stinging nettle (*Urtica dioica* L.): A reservoir of nutrition and bioactive components with great functional potential // Journal of Food Measurement and Characterization. 2017. Vol. 11. P. 423–433. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9410-4>.
- Karabacak S., Bozkurt H. Effects of *Urtica dioica* and *Hibiscus sabdariffa* on the quality and safety of sucuk (Turkish dry-fermented sausage) // Meat Science. 2008. Vol. 78, Iss. 3. P. 288–296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.06.013>.
- Khanloo M. H., Choobkar N., Aghajani A. Determination of the effect of ethanolic extract of *Ocimum basilicum* seed and *Urtica dioica* leaves on the physicochemical and sensory characteristics of sausage during cold storage // Journal of Food Science and Technology. 2020. Vol. 17, Iss. 99. P. 79–90.
- Kömürçü T. C., Bilgiçli N. Influence of powders obtained from different parts of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) on technological properties and bioactive components of noodles // Food Science and Technology Research. 2023. Vol. 29, Iss. 1. P. 717–726. DOI: <https://doi.org/10.47392/FSTR.2023.117>.
- Kőszegi K., Végvári Gy., Stefanovits-Bányai É., Békássy-Molnár E. [et al.]. Influence of the harvesting seasons on the polyphenol composition and antimicrobial activity of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) extracts // Acta Alimentaria. 2023. Vol. 52, Iss. 4. P. 589–600. DOI: <https://doi.org/10.1556/066.2023.00156>.
- Krawęcka A., Sobota A., Pankiewicz U., Zielińska E. [et al.]. Stinging nettle (*Urtica dioica* L.) as a functional component in durum wheat pasta production: Impact on chemical composition, *in vitro* glycemic index, and quality properties // Molecules. 2021. Vol. 26, Iss. 22. Article number: 6909. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26226909>.
- Kregiel D., Pawlikowska E., Antolak H. *Urtica* spp.: Ordinary plants with extraordinary properties // Molecules. 2018. Vol. 23, Iss. 7. Article number: 1664. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules23071664>.
- Maietti A., Tedeschi P., Catani M., Stevanin C. [et al.]. Nutrient composition and antioxidant performances of bread-making products enriched with stinging nettle (*Urtica dioica* L.) leaves // Foods. 2021. Vol. 10, Iss. 5. Article number: 938. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10050938>.
- Man S. M., Paucean A., Chis M. S., Muste S. [et al.]. Effect of nettle leaves powder (*Urtica dioica* L.) addition on the quality of bread // Hop and Medicinal Plants. 2019. Vol. 27, Iss. 1–2. P. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.15835/hpm.v27i1-2.13590>.
- Marchetti N., Bonetti G., Brandolini V., Cavazzini A. [et al.]. Stinging nettle (*Urtica dioica* L.) as a functional food additive in egg pasta: Enrichment and bioaccessibility of Lutein and β -carotene // Journal of Functional Foods. 2018. Vol. 47. P. 547–553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.05.062>.
- Mitrović J., Nikolić N., Karabegović I., Lazić M. The effect of thermal processing on the content and antioxidant capacity of free and bound phenolics of cookies enriched by nettle (*Urtica dioica* L.) seed flour and extract // Food Science and Technology. 2022. Vol. 42. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.62420>.
- Sahal A., Hussain A., Kumar S., Dobhal A. [et al.]. Nettle (*Urtica dioica* L.) leaves as a novel food: Nutritional, phytochemical profiles, and bioactivities // Food Chemistry: X. 2025. Vol. 28. Article number: 102607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102607>.
- Shonte T. T. Sensory and nutritional properties of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) leaves and leaf infusions. PhD thesis. University of Pretoria (South Africa). 2017.
- Singh A., Chandel V., Velmurugan A., Bhtoya R. [et al.]. Development of ice cream nutritionally enriched with *Urtica dioica* extract // Food Materials Research. 2025. Vol. 5. Article number: e003. DOI: <https://doi.org/10.48130/fmr-0025-0002>.
- Tanyitiku M. N., Bessem P., Petcheu I. C. N. Gluten-free corn cookies incorporated with stinging nettle leaf flour: Effect on physical properties, storage stability, and health benefits // International Journal of Food Science. 2024. Article number: 8864560. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/8864560>.
- Tanyitiku M. N., Petcheu I. C. N. Technofunctional properties of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) leaf flour and its enhancing pasting, physical and sensory characteristics in gluten-free rice waffles // Journal of Food Quality. 2025. Article number: 9418554. DOI: <https://doi.org/10.1155/jfq/9418554>.
- Tarasevičienė Ž., Vitkauskaitė M., Paulauskienė A., Černiauskienė J. Wild stinging nettle (*Urtica dioica* L.) leaves and roots chemical composition and phenols extraction // Plants. 2023. Vol. 12, Iss. 2. Article number: 309. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12020309>.
- Tarkanyi P., Lăcătuș M., Alexa E., Rădulescu L. [et al.]. *Urtica dioica* L. as a functional ingredient in savory cakes // Journal of Agroalimentary Processes and Technologies. 2025. Vol. 31, Iss. 2. P. 265–273. DOI: <https://doi.org/10.59463/japt2025.2.16>.
- Tofănică B.-M., Ungureanu E., Ungureanu O. C., Fortună M. E. [et al.]. Circular economy solutions: Exploring agricultural residues // Buletinul Institutului Politehnic Din Iași, Secția Chimie Și Inginerie Chimică. 2024. Vol. 70, Iss. 4. P. 33–48. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14582064>.
- Toplicean I.-M., Ianuș R.-D., Datcu A.-D. An overview on nettle studies, compounds, processing and the relation with circular bioeconomy // Plants. 2024. Vol. 13, Iss. 24. Article number: 3529. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13243529>.

- Upton R. Stinging nettles leaf (*Urtica dioica* L.): Extraordinary vegetable medicine // Journal of Herbal Medicine. 2013. Vol. 3, Iss. 1. P. 9–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2012.11.001>.
- Wójcik M. et al. Textural and sensory properties of wheat bread fortified with nettle (*Urtica dioica* L.) produced by the scalded flour method // Journal of Food Processing and Preservation. 2021. Vol. 45, Iss. 10.
- Yadav K. C., Mitchell J., Bhandari B., Prakash S. Unlocking the potential of rice bran through extrusion: A systematic review // Sustainable Food Technology. 2024. Vol. 2, Iss. 3. P. 594–614. DOI: <https://doi.org/10.1039/d4fb00027g>.

References

- Akhlan, T. B., Zhumalieva, G. E., Muldabekova, B. Zh. 2020. The influence of stinging nettle powder on the quality indicators of pasta products. *The Journal of Almaty Technological University*, 3, pp. 52–56. DOI: <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2020-3-52-56>. EDN: PMAFDE. (In Russ.)
- Degraf, E. A., Tarabanova, E. V. 2021. Biologically active substances of stinging nettle *Urtica dioica* L. Chemistry and Life: Proceedings of XX International Scientific and Practical Student Conf., Novosibirsk, May 13, 2021. Novosibirsk, pp. 46–50. EDN: KKSSMG. (In Russ.)
- Zhilkina, V. Yu., Efimova, I. A., Marakhova, A. I., Dontsova, O. N. 2017. Study of the qualitative and quantitative content of biologically active substances in a vitamin collection of nettle and rowan (review). *Drug Development & Registration*, 2(19), pp. 200–207. EDN: OSXGCL7. (In Russ.)
- Ivanova, E. S., Rodionov, Yu. V., Danilin, S. I. 2025. Production of bread using aqueous extracts of leaves of plants from the Central Black Earth Region. *Science and Education*, 8(2). EDN: CZAKXV. (In Russ.)
- Karpukhin, M. Yu., Yurin, A. A., Chusovitina, K. A. 2019. The use of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) in phytotherapy. *Agricultural Education and Science*, 4, pp. 25. EDN: WPBWEQ. (In Russ.)
- Kasumova, A. A., Alekperov, A. Yu. 2026. Prospects for using nettle in the development of functional foods. *Science Bulletin*, 1(2(95)), pp. 1030–1048. EDN: YHDBSO. (In Russ.)
- Kolomiets, N. E., Tantsereva, I. G. 2025. The genus *Urtica* L.: A poorly studied genus with great potential (review). *Chemistry of Plant Raw Material*, 2, pp. 28–46. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250215712>. EDN: IGBXDY. (In Russ.)
- Krukovich, O. V., Masansky, S. L. 2021. Control of the fermentation process of stinging nettle leaf infusion based on its redox potential. *Bulletin of the Mogilev State University of Food Science*, 1(30), pp. 20–30. EDN: KJLEKV. (In Russ.)
- Lupinskaya, S. M., Sazhenova, Yu. M. 2015. Development of a recipe for a curd product enriched with biologically active substances from nettle and sea buckthorn. *Technology and Merchandising of the Innovative Foodstuff*, 4(33), pp. 48–53. EDN: UBFOBN. (In Russ.)
- Masenkova, A. V. 2023. Development of technology for a biscuit semi-finished product based on a natural dye – A source of biologically active substances. Innovative trends in the development of Russian science: Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Krasnoyarsk, March 29–31, 2023. Krasnoyarsk, pp. 484–491. EDN: BXXTWM. (In Russ.)
- Meleshkina, L. E., Snigereva, A. V., Chervyakova, N. V. 2021. Functional pasta products. *Polzunovskiy Vestnik*, 4, pp. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.25712/astu.2072-8921.2021.04.008>. EDN: PUHPSX. (In Russ.)
- Mikhailova, Yu. A., Kravets, A. N. 2020. Development of technology for soft cheeses with coagulants of natural plant origin. *Fundamentals and Prospects of Organic Biotechnology*, 4, pp. 34–39. EDN: KVBEIW. (In Russ.)
- Mikhailova, Yu. A., Kravets, A. N. 2021. Comparative evaluation of the technology and quality of soft cheese with plant extract from nettle. *Journal of Science and Education of North-West Russia*, 7(3), pp. 43–52. EDN: ASKJXB. (In Russ.)
- Sazhenova, Yu. M. 2017. Functional curd product with nettle and rose hips. *Polzunovskiy Vestnik*, 2, pp. 23–27. EDN: ZDDVWZ. (In Russ.)
- Sazhenova, Yu. M., Lupinskaya, S. M. 2016. Development of a technology for producing curd products using wild-growing raw materials such as sea buckthorn and nettle. *Food Processing: Techniques and Technology*, 4(43), pp. 76–82. EDN: XELEM. (In Russ.)
- Semenova, S. A. 2017. Prospects for obtaining herbal tea with the addition of nettle. Young researcher: From idea to project: Proceedings of the 1st student scientific and practical conference, Yoshkar-Ola, April 28, 2017. Yoshkar-Ola, pp. 102–104. EDN: ZUKQGR. (In Russ.)
- Ushanova, V. M., Lebedeva, O. I., Repyakh, S. M. 2001. Study of the influence of growing conditions on the chemical composition of stinging nettle (*Urtica dioica* L.). *Chemistry of Plant Raw Material*, 3, pp. 97–104. EDN: HWILUV. (In Russ.)
- Chernyavskikh, V. I., Dumacheva, E. V., Dumachev, D. V. 2019. Mobilization of the adaptive potential and issues of rational use of biological resources of nettle (*Urtica dioica* L.) in the Belgorod region. II International scientific conf. "The Role of Metabolomics in Improving Biotechnological Means of Production" in the direction of "Metabolomics and Quality of Life", Moscow, June 6–7, 2019. Moscow, pp. 426–430. EDN: CFFAKW. (In Russ.)

- Chugunova, O. V., Pastushkova, E. V. 2019. Prospects for the use of plant-based raw materials for the production of antioxidant-based soft drinks. *Food Industry*, 4(1), pp. 23–33. EDN: AUXXTN. (In Russ.)
- Sharipova, A. F., Kanareikina, S. G., Kanareikin, V. I. 2016. The influence of flaxseed flour and nettle on the sensory characteristics of functional chopped semi-finished poultry products. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 6(62), pp. 182–184. EDN: XSLBAL. (In Russ.)
- Yatsuk, V. Ya., Chaly, G. A., Soshnikova, O. V. 2006. Biologically active substances of stinging nettle. *I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*, 14(1), pp. 25–29. EDN: HYSBZJ. (In Russ.)
- Adhikari, B. M., Bajracharya, A., Shrestha, A. K. 2016. Comparison of nutritional properties of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) flour with wheat and barley flours. *Food Science & Nutrition*, 4(1), pp. 119–124. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.259>.
- Amiri, Z. R., Nemati, A., Tirgarian, B., Dehghan, B. et al. 2021. Influence of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) extract-loaded nano-emulsion on the storage stability and antioxidant attributes of Doogh (Traditional Iranian yoghurt beverage). *Food Measure*, 15, pp. 437–448. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00647-2>.
- Bagheri, R., Ariaii, P., Motamedzadegan, A. 2021. Effects of chitosan incorporated with basil seed gum and nettle (*Urtica dioica* L.) essential oil on the quality of beef burger during refrigerated storage. *Food Measure*, 15, pp. 256–264. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00628-5>.
- Belščak-Cvitanović, A., Komes, D., Durgo, K., Vojvodić, A. et al. 2015. Nettle (*Urtica dioica* L.) extracts as functional ingredients for production of chocolates with improved bioactive composition and sensory properties. *Journal of Food Science and Technology*, 52, pp. 7723–7734. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1916-y>.
- Bhusal, K. K., Magar, S. K., Thapa, R., Lamsal, A. 2022. Nutritional and pharmacological importance of stinging nettle (*Urtica dioica* L.): A review. *Heliyon*, 8(6). Article number: e09717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09717>.
- Bolshakova, E. I., Poklar, U. N. 2025. Whey in 3D printing: A scoping review. *Food Metaengineering*, 3(2), pp. 106–132. DOI: <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.88>.
- Bouazizi, A., Felfoul, I., Attia, H., Karoui, R. 2022. Characterization of nettle leaves (*Urtica dioica* L.) as a novel source of protease for clotting dromedary milk by non-destructive methods. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 211. Article number: 112312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.112312>.
- Chochkov, R., Ivanova, P., Zlateva, D., Bogdanova, M. 2025. Rheological and sensory properties and bioactive compounds of wheat dough and bread enriched with nettle (*Urtica dioica* L.) flour. *Ukrainian Food Journal*, 14(3), pp. 393–405. DOI: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2025-14-3-3>.
- Devkota, H. P., Paudel, K. R., Khanal, S., Baral, A. et al. 2022. Stinging nettle (*Urtica dioica* L.): Nutritional composition, bioactive compounds, and food functional properties. *Molecules*, 27(16). Article number: 5219. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27165219>.
- Đurović, S., Kojić, I., Radić, D., Smyatskaya, Y. A. et al. 2024. Chemical constituents of stinging nettle (*Urtica dioica* L.): A comprehensive review on phenolic and polyphenolic compounds and their bioactivity. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(6). Article number: 3430. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25063430>.
- Đurović, S., Pavlič, B., Šorgić, S., Popov, S. 2017. Chemical composition of stinging nettle leaves obtained by different analytical approaches. *Journal of Functional Foods*, 32, pp. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.02.019>.
- Đurović, S., Vujanović, M., Radojković, M., Filipović, J. et al. 2020. The functional food production: Application of stinging nettle leaves and its extracts in the baking of a bread. *Food Chemistry*, 312. Article number: 126091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126091>.
- Flórez, M., Vázquez, M., Cazón, P. 2023. Enhancing the quality of Havarti cheese: Chitosan films with nettle *Urtica dioica* L. extract as slice separators to retard lipid oxidation. *LWT*, 189. Article number: 115504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115504>.
- Grauso, L., de Falco, B., Lanzotti, V., Motti, R. 2020. Stinging nettle, *Urtica dioica* L.: Botanical, phytochemical and pharmacological overview. *Phytochemistry Reviews*, 19, pp. 1341–1377. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11101-020-09680-x>.
- Jaiswal, V., Lee, H.-J. 2022. Antioxidant activity of *Urtica dioica*: An important property contributing to multiple biological activities. *Antioxidants*, 11(12). Article number: 2494. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11122494>.
- Jan, K. N., Zarafshan, K., Singh, S. 2017. Stinging nettle (*Urtica dioica* L.): A reservoir of nutrition and bioactive components with great functional potential. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11, pp. 423–433. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9410-4>.
- Karabacak, S., Bozkurt, H. 2008. Effects of *Urtica dioica* and *Hibiscus sabdariffa* on the quality and safety of sucuk (Turkish dry-fermented sausage). *Meat Science*, 78(3), pp. 288–296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.06.013>.
- Khanloo, M. H., Choobkar, N., Aghajani, A. 2020. Determination of the effect of ethanolic extract of *Ocimum basilicum* seed and *Urtica dioica* leaves on the physicochemical and sensory characteristics of sausage during cold storage. *Journal of Food Science and Technology*, 17(99), pp. 79–90.

- Kömürçü, T. C., Bilgiçli, N. 2023. Influence of powders obtained from different parts of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) on technological properties and bioactive components of noodles. *Food Science and Technology Research*, 29(1), pp. 717–726. DOI: <https://doi.org/10.47392/FSTR.2023.117>.
- Kőszegi, K., Végvári, Gy., Stefanovits-Bányai, É., Békássy-Molnár, E. et al. 2023. Influence of the harvesting seasons on the polyphenol composition and antimicrobial activity of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) extracts. *Acta Alimentaria*, 52(4), pp. 589–600. DOI: <https://doi.org/10.1556/066.2023.00156>.
- Krawęcka, A., Sobota, A., Pankiewicz, U., Zielińska, E. et al. 2021. Stinging nettle (*Urtica dioica* L.) as a functional component in durum wheat pasta production: Impact on chemical composition, *in vitro* glycemic index, and quality properties. *Molecules*, 26(22). Article number: 6909. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26226909>.
- Kregiel, D., Pawlikowska, E., Antolak, H. 2018. *Urtica* spp.: Ordinary plants with extraordinary properties. *Molecules*, 23(7). Article number: 1664. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules23071664>.
- Maietti, A., Tedeschi, P., Catani, M., Stevanin, C. et al. 2021. Nutrient composition and antioxidant performances of bread-making products enriched with stinging nettle (*Urtica dioica* L.) leaves. *Foods*, 10(5). Article number: 938. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10050938>.
- Man, S. M., Paucean, A., Chis, M. S., Muste, S. et al. 2019. Effect of nettle leaves powder (*Urtica dioica* L.) addition on the quality of bread. *Hop and Medicinal Plants*, 27(1–2), pp. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.15835/hpm.v27i1-2.13590>.
- Marchetti, N., Bonetti, G., Brandolini, V., Cavazzini, A. et al. 2018. Stinging nettle (*Urtica dioica* L.) as a functional food additive in egg pasta: Enrichment and bioaccessibility of Lutein and β -carotene. *Journal of Functional Foods*, 47, pp. 547–553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.05.062>.
- Mitrović, J., Nikolić, N., Karabegović, I., Lazić, M. 2022. The effect of thermal processing on the content and antioxidant capacity of free and bound phenolics of cookies enriched by nettle (*Urtica dioica* L.) seed flour and extract. *Food Science and Technology*, 42. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.62420>.
- Sahal, A., Hussain, A., Kumar, S., Dobhal, A. et al. 2025. Nettle (*Urtica dioica* L.) leaves as a novel food: Nutritional, phytochemical profiles, and bioactivities. *Food Chemistry: X*, 28. Article number: 102607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102607>.
- Shonte, T. T. 2017. Sensory and nutritional properties of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) leaves and leaf infusions. PhD thesis. University of Pretoria (South Africa).
- Singh, A., Chandel, V., Velmurugan, A., Bhtoya, R. et al. 2025. Development of ice cream nutritionally enriched with *Urtica dioica* extract. *Food Materials Research*, 5. Article number: e003. DOI: <https://doi.org/10.48130/fmr-0025-0002>.
- Tanyitiku, M. N., Bessem, P., Petcheu, I. C. N. 2024. Gluten-free corn cookies incorporated with stinging nettle leaf flour: Effect on physical properties, storage stability, and health benefits. *International Journal of Food Science*. Article number: 8864560. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/8864560>.
- Tanyitiku, M. N., Petcheu, I. C. N. 2025. Technofunctional properties of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) leaf flour and its enhancing pasting, physical and sensory characteristics in gluten-free rice waffles. *Journal of Food Quality*. Article number: 9418554. DOI: <https://doi.org/10.1155/jfq/9418554>.
- Tarasevičienė, Ž., Vitkauskaitė, M., Paulauskienė, A., Černiauskienė, J. 2023. Wild stinging nettle (*Urtica dioica* L.) leaves and roots chemical composition and phenols extraction. *Plants*, 12(2). Article number: 309. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12020309>.
- Tarkanyi, P., Lăcătuș, M., Alexa, E., Rădulescu, L. et al. 2025. *Urtica dioica* L. as a functional ingredient in savory cakes. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 31(2), pp. 265–273. DOI: <https://doi.org/10.59463/japt2025.2.16>.
- Tofănică, B.-M., Ungureanu, E., Ungureanu, O. C., Fortună, M. E. et al. 2024. Circular economy solutions: Exploring agricultural residues. *Buletinul Institutului Politehnic Din Iași, Secția Chimie Și Inginerie Chimică*, 70(4), pp. 33–48. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14582064>.
- Toplicean, I.-M., Ianuș, R.-D., Datcu, A.-D. 2024. An overview on nettle studies, compounds, processing and the relation with circular bioeconomy. *Plants*, 13(24). Article number: 3529. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13243529>.
- Upton, R. 2013. Stinging nettles leaf (*Urtica dioica* L.): Extraordinary vegetable medicine. *Journal of Herbal Medicine*, 3(1), pp. 9–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2012.11.001>.
- Wójcik, M. et al. 2021. Textural and sensory properties of wheat bread fortified with nettle (*Urtica dioica* L.) produced by the scalded flour method. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(10).
- Yadav, K. C., Mitchell, J., Bhandari, B., Prakash, S. 2024. Unlocking the potential of rice bran through extrusion: A systematic review. *Sustainable Food Technology*, 2(3), pp. 594–614. DOI: <https://doi.org/10.1039/d4fb00027g>.

Сведения об авторах

Шариков Антон Юрьевич – ул. Самокатная, 4Б, г. Москва, Россия, 111033;
Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал
Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи,
канд. техн. наук;
e-mail: anton.sharikov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9483-5209>

Anton Yu. Sharikov – 4B Samokatnaya Str., Moscow, Russia, 111033;
Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – Branch of the Federal Research Centre
of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Cand. Sci. (Engineering);
e-mail: anton.sharikov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9483-5209>

Голубев Алексей Алексеевич – ул. Самокатная, 4Б, г. Москва, Россия, 111033;
Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал
Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи,
канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник;
e-mail: foodbiotech@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3847-6472>

Alexey A. Golubev – 4B Samokatnaya Str., Moscow, Russia, 111033;
Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – Branch of the Federal Research Centre
of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Cand. Sci. (Engineering), Junior Researcher;
e-mail: foodbiotech@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3847-6472>

Амелякина Мария Валентиновна – ул. Самокатная, 4Б, г. Москва, Россия, 111033;
Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал
Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи,
канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: masha.am@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5138-6746>

Maria V. Amelyakina – 4B Samokatnaya Str., Moscow, Russia, 111033;
Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – Branch of the Federal Research Centre
of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher;
e-mail: masha.am@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5138-6746>

Иванов Виктор Витальевич – ул. Самокатная, 4Б, г. Москва, Россия, 111033;
Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал
Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи,
канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: ivanov.v.v55@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6492-7070>

Viktor V. Ivanov – 4B Samokatnaya Str., Moscow, Russia, 111033;
Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – Branch of the Federal Research Centre
of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher;
e-mail: ivanov.v.v55@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6492-7070>

Абрамова Ирина Михайловна – ул. Самокатная, 4Б, г. Москва, Россия, 111033;
Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал
Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, д-р техн. наук;
e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9297-0554>

Irina M. Abramova – 4B Samokatnaya Str., Moscow, Russia, 111033;
Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – Branch of the Federal Research Centre
of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Dr. Sci. (Engineering);
e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9297-0554>

Требования к рукописи статьи

Общие требования

Оригинальность текста	В статьях допускается не более 20 % заимствованного текста из открытых источников.
Объем статьи	Максимальный объем статьи – 10 страниц (включая библиографический список).
Формат файла	Электронный вариант статьи выполняется в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением *.doc, *.docx. В имени файла указывается фамилия и инициалы автора.
Параметры страницы	Формат А4. Поля: левое – 2,5 см, правое – 2,5 см, верхнее – 2,5 см, нижнее – 2,5 см.
Форматирование текста	Шрифт: Times New Roman. Размер шрифта – 10, абзацный отступ – 1,0, выравнивание по ширине. Межстрочный интервал – одинарный. Переносы слов не допускаются. Заголовки разделов помещают отдельной строкой через один межстрочный интервал после текста, печатают с прописной буквы. Шрифт полужирный, размер шрифта – 10, выравнивание по левому краю.

Требования к содержанию и оформлению структурных элементов рукописи

Индекс УДК	Индекс УДК помещают перед инициалами и фамилией автора отдельной строкой. Шрифт обычный, размер шрифта – 12, выравнивание по левому краю.
Автор (авторы)	Инициалы и фамилию автора(ов) на русском языке помещают после индекса УДК. Шрифт обычный, размер шрифта – 12, выравнивание по центру.
Заглавие	Заглавие помещают через один межстрочный интервал после инициалов и фамилии автора(ов), печатают с прописной буквы без точки в конце. Перевод инициалов, фамилии автора(ов) и заглавия на английский язык помещают соответственно после инициалов, фамилии авторов и заглавия на русском языке. Шрифт полужирный, размер шрифта – 12, выравнивание по центру.
Реферат	Рекомендуемый объем текста реферата 200–250 слов. Реферат на русском языке помещают через один межстрочный интервал после заглавия на английском языке. Перевод реферата на английский язык помещают через один межстрочный интервал после реферата на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, выравнивание по ширине.
Ключевые слова	Ключевые слова на русском языке помещают через один межстрочный интервал после аннотации на английском языке и разделяются запятой. Перевод ключевых слов на английский язык помещают на следующей строке после ключевых на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 8, выравнивание по левому краю.
Основной текст	Рекомендуемая структура основного текста статьи: введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, благодарности. Иллюстрации и таблицы помещаются в тексте статьи по месту их первого упоминания. Иллюстрации, таблицы и формулы нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией.
Библиографический список, библиографические ссылки	Библиографический список помещают через один межстрочный интервал после текста статьи. Перевод библиографического списка на английский язык помещают через один межстрочный интервал после библиографического списка на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, без абзацного отступа, выравнивание по ширине.
Сведения об авторе(ах)	Сведения об авторе(ах) помещают через один межстрочный интервал после библиографического списка. Фамилия Имя Отчество – шрифт полужирный, размер шрифта – 10. Почтовый адрес, наименование организации, ученая степень, звание, академический статус, должность, e-mail. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, выравнивание по левому краю.

Журнал зарегистрирован

Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-26674 от 22 декабря 2006 г.

Оформить подписку на журнал «Вестник МГТУ» можно:

– по Объединенному каталогу «ПРЕССА РОССИИ». Подписной индекс – 41212

URL: <https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/i41212/>

Журнал включен:

в Перечень российских рецензируемых научных журналов,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук;

в «Белый список» научных журналов;

в Российский индекс научного цитирования;

в базы данных: Zoological Record на платформе Web of Science (WoS), Food Science and
Technology Abstracts (FSTA), GeoRef.

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
95 2000 ОК 005-93

ВЕСТНИК МГТУ

Том 29, № 3 (июль – сентябрь) 2026 г.



Подписано в печать 21.09.2026
Дата выхода в свет 29.09.2026
Формат 60×84/8. Бумага типографская
Печать ризографическая
Усл. печ. л. 21.62. Тираж 500 экз. Заказ № 123.
Цена 2 961 р. 00 коп.

Адрес издателя:
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13

Отпечатано в Издательстве МАУ:
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13