



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 338.439.01
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.010

EDN: GPKWYX

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИФЕНОЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Иван Николаевич Кобзарь¹, Наталья Алексеевна Бугаец²,
Наталья Тимофеевна Шамкова³

^{1, 2, 3} Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

¹ ivan.kobzar.00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2589-3077>

² kubanochka23@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4012-8837>

³ shamkova75@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5131-6502>

Аннотация. Пищевые отходы растительного происхождения на современном этапе развития пищевой и перерабатывающей промышленности рассматриваются как перспективный источник полифенольных соединений, представляющих значительный интерес благодаря их выраженной биологической активности.

Целью исследования явились анализ и систематизация существующих технологий экстракции полифенольных веществ из растительного сырья, включая традиционные и инновационные подходы, а также оценка их эффективности и практического потенциала.

Анализ источников информации установил перспективность экологически безопасных методов извлечения фенольных компонентов из растительных отходов, основывающихся на использование комплексов ферментов и микроорганизмов. Ферментативные методы экстракции позволяют создавать мягкие условия процесса экстракции, что обеспечивает сохранение структуры и биологической активности термолабильных соединений. Комбинированные методы обладают преимуществами по сравнению с традиционными, в том числе с точки зрения экологичности.

Научная новизна исследования заключается в систематизации данных о комбинированных методах экстракции, включающих ферментативную обработку в сочетании с другими технологиями. Практическая значимость работы определяется возможностью применения полученных результатов для разработки инновационных решений в пищевой промышленности, повышения эффективности использования растительного сырья и создания функциональных продуктов питания.

Применение современных методов экстракции открывает новые перспективы для переработки растительного сырья. Дальнейшее развитие этих технологий должно быть направлено на повышение их эффективности, совершенствование экономических показателей и расширение области применения.

Ключевые слова: полифенольные соединения, растительное сырье, пищевые отходы, биотехнологические методы, ферментативная экстракция, биологически активные вещества, антиоксидантная активность, функциональные продукты, зеленая экстракция.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Агеевой Наталье Михайловне – главному научному сотруднику НЦ «Виноделие» ФГБНУ СКФНЦСВ, доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки Российской Федерации и Кубани, за её ценные советы и поддержку.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ и КНФ № 25-16-20071 «Исследование и разработка специализированных пищевых модулей на основе фенольных и белковых соединений с целью получения продуктов питания для профилактики алиментарно-зависимых заболеваний».

Для цитирования: Кобзарь И. Н., Бугаец Н. А., Шамкова Н. Т. Перспективные технологии получения полифенольных веществ из отходов растительного сырья // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 60–72. doi: [10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.010. EDN: https://elibrary.ru/GPKWYX](https://elibrary.ru/GPKWYX).

Original article

PROMISING TECHNOLOGIES FOR OBTAINING POLYPHENOLIC SUBSTANCES FROM PLANT RAW MATERIAL WASTE

Ivan N. Kobzar, ¹, Nataliya A. Bugaets ², Nataliya T. Shamkova ³

^{1, 2, 3} Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

¹ ivan.kobzar.00@mail.ru <https://orcid.org/0009-0000-2589-3077>

² kubanochka23@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4012-8837>

³ shamkova75@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5131-6502>

© Кобзарь И. Н., Бугаец Н. А., Шамкова Н. Т., 2025

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИФЕНОЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Abstract. Food waste of plant origin at the present stage of development of food and processing industry are considered as a promising source of polyphenolic compounds, which are of considerable interest due to their pronounced biological activity.

The aim of the study was to analyze and systematize existing technologies for the extraction of polyphenolic substances from plant raw materials, including traditional and innovative approaches, as well as to assess their effectiveness and practical potential.

Analysis of information sources established the prospects of environmentally friendly methods for extracting phenolic components from plant waste, based on the use of enzyme complexes and microorganisms. Enzymatic extraction methods allow creating mild conditions for the extraction process, which ensures the preservation of the structure and biological activity of heat-labile compounds. Combined methods have advantages over traditional ones, including from the point of view of environmental friendliness.

The scientific novelty of the study lies in the systematization of data on combined extraction methods, including enzymatic treatment in combination with other technologies. The practical significance of the work is determined by the possibility of using the obtained results to develop innovative solutions in the food industry, increase the efficiency of using plant materials and create functional food products.

The use of modern extraction methods opens up new prospects for processing plant materials. Further development of these technologies should be aimed at increasing their efficiency, improving economic indicators and expanding the scope of application.

Keywords: polyphenolic compounds, plant raw materials, food waste, biotechnological methods, enzymatic extraction, biologically active substances, antioxidant activity, functional products, green extraction.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Natalia Mikhailovna Ageeva, Chief Researcher of the Scientific Center "Winemaking" of the Federal State Budgetary Scientific Institution SKFNCSVV, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation and Kuban, for her valuable advice and high professionalism.

Funding: The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the KNF grant No. 25-16-20071 "Research and development of specialized food modules based on phenolic and protein compounds in order to obtain food products for the prevention of alimentary-dependent diseases."

For citation: Kobzar, I.N., Bugaets, N.A. & Shamkova, N.T. (2025). Promising Technologies for Obtaining Polyphenolic Substances from Plant Raw Material Waste. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 60-72. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.010. EDN: <https://elibrary.ru/GPKWYX>.

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации ежегодно образуется около 17 млн тонн пищевых отходов, подавляющая часть которых (94 %) не перерабатывается и становится источником экологического загрязнения [1]. Аналогичная ситуация наблюдается в развивающихся странах, где до 25 % потерь плодовоощной продукции происходит на этапах переработки. Современная пищевая промышленность разрабатывает эффективные методы переработки таких отходов, позволяя трансформировать их в продукты питания, функциональные ингредиенты, экстракты и другие востребованные компоненты [2, 3].

Ценными биоактивными веществами, содержащимися в растительном сырье, являются полифенолы. Их молекулярная структура включает несколько фенольных групп, что определяет их классификацию на фенольные кислоты, стильбены, флавоноиды, лигнаны и др. Полифенольные соединения, благодаря комплексу своих полезных свойств и биотехнологическому потенциалу, используются как натуральные антиоксиданты, функциональные добавки, активные компоненты лекарственных препаратов и биологически активных добавок [4, 5].

Развитие технологий экстракции биологически активных соединений из растительных отходов на современном этапе развития науки представляет теоретический и практический интерес.

Целью настоящего исследования явился анализ и выявление эффективных технологий получения полифенольных соединений из растительного сырья для их дальнейшего применения в производстве функциональных продуктов питания. Результаты исследования могут способствовать разработке инновационных решений в пищевой технологии, повышению добавленной стоимости растительного сырья и устойчивому развитию отрасли.

МЕТОДЫ

Для проведения комплексного анализа использовались научные статьи, монографии и обзоры, найденные в международных базах данных (Pub Med, Science Direct, Springer Science) и российских научных электронных библиотеках (eLibrary, РИНЦ, Scholar). Поиск литературы осуществлялся с использованием следующих ключевых терминов: "полифенолы", "экстракция флавоноидов", "методы зеленой экстракции", "фенольные соединения", "технология извлечения полифенолов", "проантоксиандины".

Исследование проводилось с применением стандартных научных методов, включающих систематический поиск и скрининг научной литературы, критический анализ и извлечение релевантных данных, систематизацию и обобщение полученной информации. Временные рамки исследования ограничены периодом 2018–2025 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для получения полифенольных веществ из растительного сырья используются различные технологии, основывающиеся на физических, химических, биохимических методах [5].

Технологии экстракции полифенолов-антисидантов включают все современные подходы: жидкостно-жидкостную экстракцию, сверхкритическую жидкостную экстракцию, ультразвуковую экстракцию, использование природных эвтектических растворителей, методы импульсного электрического поля, микроволновые технологии, ферментативную экстракцию и др. [6]. При необходимости растворителями могут служить метanol, этанол, изопропанол, ацетон, вода, этилацетат, диметилформамид и их смеси.

Традиционные методы экстракции, несмотря на свою распространённость, имеют недостатки: высокий

расход органических растворителей, длительность процесса, невозможность точного контроля параметров и др. Эти ограничения ведут к активному развитию инновационных "зеленых" технологий, минимизирующих негативное воздействие на окружающую среду при сохранении высокой эффективности процесса [4].

Развитие таких технологий связано с необходимостью оптимизации использования отходов растительного сырья, которые отличаются повышенным содержанием полифенолов, в сравнение с основными частями растений.

Перспективными в современных условиях являются биохимические и комбинированные методы экстракции. Как и к традиционным, к ним предъявляются комплексные требования экологичности, экономической целесообразности и высокой эффективности.

Биохимические методы

Биохимические или биотехнологические методы позволяют реализовать принципы безотходного производства в пищевой промышленности.

Ферментативный гидролиз клеточных стенок представляет собой альтернативный подход к экстракции полифенолов. Механизм действия основан на специфическом взаимодействии фермента с компонентами клеточной стенки, приводящем к разрыву структурных связей и выходу внутриклеточных соединений. Эффективность ферментолиза существенно зависит от оптимальных значений pH и температуры, которые индивидуальны для каждого типа фермента [7].

Данный метод отличается экологической безопасностью, так как позволяет значительно сократить использование органических растворителей и уменьшить продолжительность процесса по сравнению с традиционными методами экстракции [8].

Так, ферментативная обработка ягодных выжимок оказывает комплексное воздействие на их технологические и функциональные свойства. Помимо выраженного разжижающего эффекта отмечается значительное повышение антиоксидантного потенциала сырья. Увеличивается содержание органических кислот (лимонной, L-яблочной, бензойной, хлорогеновой); витаминов (аскорбиновой кислоты, витамина Р); растворимых пектинов; полифенольных соединений.

Исследование клеточных культур *Vaccinium vitis-idaea* и *Oxycoccus palustris* Pers. продемонстрировало возможность получения полифенолов через процесс каллусогенеза. Культивирование проводилось в контролируемых условиях: освещенность 100 мкмоль квантов/м², фотопериод 20 часов, pH 5,2-5,4, с использованием питательных сред Мурасиге-Скуга, Андерсона и специально разработанной среды, обогащенной фитогормонами ауксинами и цитокининами. Полученные биомассы показали перспективность для создания микрокапсулированных пищевых добавок с иммуномодулирующими свойствами [9].

Исследование воздействия пектолитических ферментов (*Pectinex BE XXL* и *Fructozym P*) на биоактивные компоненты сока бузины (*Sambucus nigra L.*) выявило существенные различия в эффективности экстракции. Применение ферментных препаратов перед прессованием плодов обеспечивало увеличение содержания полифенолов и антоцианов. Микрофильтрация через керамическую мембрану продемонстрировала меньшие потери антиоксидантов в ферментированных образцах, при этом содержание полифенолов в ретентате составляло 53-72 % от исходного сока [10].

Установлено, что ферментативная обработка мезги ягод вишни не только увеличивает выход сока, но и влияет на стабильность фенольных соединений при хранении. Наибольшее воздействие на концентрацию полифенолов оказывали целлюлаза и протеаза, тогда как пектиназа проявляла меньшую активность. Спиртованные соки из обработанной мезги демонстрировали на 10 % большее снижение содержания фенольных веществ, но при этом проявляли повышенную устойчивость к температурным помутнениям [11].

Оптимальный подбор ферментных препаратов и их комбинаций служит эффективным инструментом для управления качеством соков при промышленном производстве.

Выявлена зависимость выхода полифенолов бурых водорослей (*Ascophyllum nodosum* и *Undaria pinnatifida*) от типа фермента и параметров процесса. Максимальное содержание полифенолов (0,0141–0,0172 %) достигалось через 24 ч гидролиза при использовании бета-глюканазы и целлюлазы в оптимальных соотношениях фермент: субстрат (1:5–1:10). Дальнейшее увеличение времени обработки приводило к снижению содержания целевых соединений, что свидетельствует о необходимости строгого контроля продолжительности процесса [12].

Применение ферментного препарата Тренолин Опти ДФ (15 % раствор, 2 мл/кг) для обработки облепихи в течение 4 часов позволило значительно улучшить экстракцию биологически активных веществ. В результате наблюдалось увеличение содержания: полифенолов на 12–17 %, витамина Р – на 8–15 %, аскорбиновой кислоты – на 8–10 % и токоферолов – на 9–11 % по сравнению с контрольными образцами [13].

Изучение влияния пектолитических ферментов (Фруктоцим П6-Л, Фруктоцим П, Фруктоцим МА) на различные виды растительного сырья показало, что эффективность экстракции существенно зависит от плотности мякоти. Оптимальные дозировки ферментов (0,01–0,07 % от массы мезги) позволяли увеличить выход сока на 6–17 %, при этом максимальное содержание полифенолов достигалось при использовании индивидуально подобранных ферментных препаратов для каждого типа сырья [14].

Традиционные методы экстракции растворимых веществ из сушеного сырья (рябины и чернослива) характеризуются значительной продолжительностью процесса, достигающей 12–24 суток при двукратном настаивании. Разработка мультиэнзимных композиций позволила существенно сократить время экстракции [15].

Так, пектолитические препараты содержат сопутствующие ферменты амилолитического и целлюлолитического действия, следовые количества кислой протеазы, однако полностью лишены гемицеллюлазной активности. В отличие от них целлюлазные препараты демонстрируют выраженную гемицеллюлазную активность. Протеолитические ферменты характеризуются высокой степенью специфичности без присутствия сопутствующих ферментативных активностей (табл. 1) [15]. Подобные различия в ферментном составе оказывают существенное влияние на эффективность гидролиза растительного сырья, что необходимо учитывать при разработке оптимальных мультиэнзимных композиций для обработки конкретных видов субстрата.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИФЕНОЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Таблица 1 – Комплексная характеристика ферментных активностей препаратов, ед/г
Table 1 – Comprehensive characteristics of enzyme activities of preparations, U/g

Вид ферментной активности	Препарат		
	пектиназа	целлюлаза	кислая протеаза
Общая пектолитическая (ПКС*)	98,4	следы	–
Эндо-полиметилгалактуроназная (Эндо-ПМГ*)	128,0	следы	–
Пектинэстеразная (ПЭ)	44,4	–	–
β-Глюканазная (β-ГЛА)	–	8,1	–
β-Маннаназная (β-МА)	–	390,0	–
Целлюлополитическая (ЦА)	67,7	330,0	–
Протеолитическая (ПА)	0,5	0,4	30,0
Амилолитическая (АА)	10,0	–	–

*ПКС – совокупная пектолитическая активность, определяемая титриметрическим методом;

Эндо-ПМН – активность эндо-полиметилгалактуроназы, определяемая вискозиметрически.

Были разработаны оптимальные мультиэнзимные композиции для предварительной обработки сушеної рябины и чернослива. Для рябины применяли 5-часовую ферментацию, для чернослива – 2-часовую при температуре 40 °C. Последующая экстракция проводилась 50 % этиловым спиртом в соотношении сырье: экстрагент 1:4 до достижения динамического равновесия между фазами [15]. Ферментная обработка сырья комбинацией целлюлазы (0,5 %) и пектиназы (0,1 %) не только увеличивает выход экстрактивных веществ и органических кислот, но и обеспечивает улучшение дренажных свойств мезги.

Разработана технология производства ферментированного сока черноплодной рябины, сочетающая применение специализированных ферментных препаратов с дрожжами расы Франс Суперстарт. Данный подход позволяет получить продукт с улучшенными органолептическими и технологическими характеристиками [16].

Комплексные ферментные препараты Экстрапект Колос (пектиназа, гемицеллюлаза) и Экстрапект Супер Клар (пектиназа, гемицеллюлаза, рамназа, галактаза) температуре от 45 °C до 55 °C и pH в диапазоне от 3,0 до 5,0 ед демонстрируют высокую эффективность в гидролизе пектиновых веществ за счет разрушения сложноэфирных связей. Применение данных препаратов способствует значительному увеличению выхода сока и обогащению жидкой фракции растворимыми сухими веществами, включая полифенольные соединения.

Исследование ферментированных соков черноплодной рябины показало, что использование Экстрапекта

Супер Клар позволяет увеличить содержание полифенолов в 1,7 раза в сравнении с контрольными образцами: остаточное содержание сахаров – 0,36–0,59 г/100 г, концентрация летучих кислот 0,12–0,18 г/дм³ (значительно ниже ПДК 1,20 г/дм³), сумма полифенолов – 3070 мг/дм³ и антоцианов – 551,98 мг/дм³. [17].

Исследовано влияние трех гидролитических ферментов – целлюлазы, пектиназы и гемицеллюлазы – на извлечение полифенольных соединений из виноградной выжимки (*Vitis vinifera*). В эксперименте применялись промышленные ферментные препараты (Celluclast 1.5L, Pectinex Ultra SP-L и Viscozyme L), активные в отношении соответствующих полисахаридов клеточной стенки растительного материала [18]. Ферментативная экстракция проводилась при контролируемых параметрах pH, температуры и продолжительности, с последующим определением содержания фенольных соединений. Наиболее высокий выход суммарных полифенолов был получен при использовании пектиназы. То есть комбинированное применение ферментов не всегда обеспечивает синергетический эффект, в ряде случаев однокомпонентная обработка оказывается более результативной.

Ферментативные методы экстракции обеспечивают мягкие условия процесса, в результате чего сохраняются структуры и биологическая активность термолабильных соединений (табл. 2). При этом замена агрессивных органических растворителей на природные ферменты значительно снижает экологическую нагрузку и повышает безопасность производства.

Таблица 2 – Сравнительный анализ биотехнологических методов экстракции полифенолов из растительного сырья
Table 2 – Comparative analysis of biochemical methods for obtaining polyphenols from plant raw materials

Метод	Источники полифенолов	Биоактиваторы (биокатализаторы)	Описание метода	Эффективность метода
Микробная (микробиологическая) ферментация	Кожица лука в качестве субстрата для биопроцессов [19]	Штаммы: дрожжевые <i>Zygosaccharomyces trakii</i> CL 30-29, <i>Saccharomyces cerevisiae</i> En SC, бактериальные <i>L. plantarum</i> C 180-34, <i>Lactiplantibacillus plantarum</i> TB 11-32.	В исследовании применен метод биопропективинга, охвативший 94 бактериальных и 45 дрожжевых штаммов, выделенных из разнообразных агропродовольственных и экологических ниш. После первичного отбора и подготовки культур проводили двухэтапный скрининг: (1) оценку амилолитической активности по зонам гидролиза на агаре с 1% (w/v) растворимым крахмалом, и (2) анализ продукции полифенолов. Для оценки использовали жидкую подкисленную ферментацию, управляемую выбранными штаммами.	Содержание агликона кверцетина увеличивается от 25 % до 60 % от исходного сырья.
	<i>Urtica dioica</i> L. (крапива) [20]	Эндофитные бактерии, живущие в <i>Urtica dioica</i> L. (крапиве): штамм <i>Bacillus cereus</i> и штамм <i>Bacillus</i>	Эндофитные бактерии обладают способностью к одновременной экзогенной продукции амилаз, катализирующих гидролиз крахмала, и эндогенному синтезу полифенольных соединений. Для выделения микроорганизмов использовали селективные питательные среды с последующей видо-	Грамположительные эндофитные бактерии из <i>Bacillus</i> spp. способны синтезировать <i>in vitro</i> фенольные соединения в диапазоне

Метод	Источники полифенолов	Биоактиваторы (биокатализаторы)	Описание метода	Эффективность метода
		<i>muscoides</i> .	вой идентификацией (16S рРНК-анализ). Отобранные штаммы культивировали в двухфазной системе: первичный посев осуществляли на агаризованную среду с 1,5% (w/v) крахмала, затем переводили в жидкую культуральную среду, где крахмал служил единственным источником углерода. Для экстрагирования полифенолов из культуральной жидкости эндофитных бактерий, выделенных из <i>Urtica dioica</i> L., использовали дериватизацию.	0,325–1,633 моль/дм ³ .
Ферментативный гидролиз	Листья зелёного чая сорта Greenfield Flying Dragon [21].	Ферментный препарат целлюлополитического действия (ЦеллоЛюкс-А).	Для получения водных экстрактов зелёного чая с высоким содержанием фенольных веществ рекомендуется использовать гидромодуль 1:20. Определён режим получения экстракта зелёного чая (температура 60 °C, длительность 75 мин, доза внесения ЦеллоЛюкс-А 0,09 % от массы сырья), обеспечивающий концентрацию фенольных веществ в экстракте в количестве 988 мг/дм ³ .	Выход фенольных веществ относительно контрольного образца увеличился на 45 %.
	Виноградная выжимка (гроздьев сорт <i>Vitis vinifera</i>) [18].	Пектиназа (Pectinex® Ultra SP-L), целлюлопаза (Celluclast® 1.5L) и гемицеллюлопаза (Viscozyme® L).	Ферментативная экстракция полифенольных соединений из виноградной выжимки осуществлялась при гидромодуле 1:10 (10 г сухой выжимки на 100 мл буферного раствора с pH 4,5) при температуре 50 °C в течение 120 минут. Ферментные препараты вводили в дозировке 0,1 мл на 1 г сырья. Реакция проводилась на встряхивателе при скорости 150 об/мин. После ферментативной обработки растворы выдерживали 10 минут при кипячении для инактивации ферментов, затем центрифугировали и фильтровали для отделения твердых остатков.	Пектиназа показала наилучшие результаты в экстракции антоцианов, тогда как целлюлопаза была наиболее эффективна для высвобождения флавоноидов.
	Бузина садовая (сорт <i>Sambucus nigra</i> L.) [10].	Пектолитические ферменты (Pectinex BE XXL и Fructozym P).	Замороженные плоды бузины размораживали путем нагрева острым паром до 45–55 °C, после чего измельчали до размера частиц мезги 3–6 мм, прогревали до 80 °C для инактивации ферментов и охлаждали до 30 °C. Сок получали в два этапа: сначала вносили 0,20 мл/кг Pectinex BE XXL и 0,06 мл/кг Fructozym P с инкубацией 1 ч, затем проводили ручное прессование; оставшуюся мезгу обрабатывали половиной исходной дозы ферментов (0,10 мл/кг Pectinex BE XXL и 0,03 мл/кг Fructozym P) в течение 30 мин для повышения эффективности экстракции. Обработанный сок подвергали микрофильтрации на керамической трубчатой мемbrane (размер пор 0,8 мкм, площадь 0,005 м ²) со статическим смесителем для интенсификации процесса.	В образцах, обработанных Fructozym P, содержание полифенолов было максимальным (на 30–40 % выше, чем в контрольном образце без ферментов), а антиоксидантная активность достигала 52,31 мг/л. Однако данный фермент снижал скорость микрофильтрации (6 л/м ² ·ч) из-за повышенного содержания высокомолекулярных соединений.
	Вишня сорта Молодежная (мезга) [11].	Фруктоцим П6 Л (пектинэстераза), ЦеллоЛюкс А (целлюлопаза), Протеаза кислая.	Вишню, замороженную и хранившуюся в течение 4 месяцев при -18 °C, размораживали при 4 °C в течение 12 ч, после чего измельчали до размера частиц 8 мм. Полученную мезгу обрабатывали ферментными препаратами Фруктоцим П6 Л (пектинэстераза), ЦеллоЛюкс А (целлюлопаза), Протеаза кислая. Образцы выдерживались на водяной бане в течение 2 ч при температуре 55 °C с постоянным перемешиванием. Затем подвергали прессованию под постоянным усилием 5 кгс. Выделенный сок фильтровали через бумажный фильтр толщиной 0,35 мм в вакуумированную колбу Бунзена (остаточное давление 0,1 бар).	Сок, полученный из мезги с содержанием ферментов Фруктоцим П6 Л 1 ед., ЦеллоЛюкс А 1,5 ед. и Протеаза кислая 0,1 ед. в 1 г обладает лучшими показателями по прозрачности, количеству фенольных веществ и выходу.
	Плоды сортов вишни: «Игрушка»,	Пектолитические ферментные препараты	Пектолитический ферментный препарат смешивают с 5–10-кратным количеством плодового сока, подогретого до 30–45 °C.	Оба препарата способствовали повышению содерж-

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИФЕНОЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Метод	Источники полифенолов	Биоактиваторы (биокатализаторы)	Описание метода	Эффективность метода
	«Тамарис», «Краснодарская сладкая», «Призвание» [22].	«Тренолин Опти ДФ» и «Фруктоцим П6-Л».	Полученный раствор тщательно перемешивают и настаивают 30 мин. Затем его вносят в плодовую массу и подогревают до 40–45 °C. Выдерживают от 3 до 6 ч, в зависимости от вида сырья, и отправляют на дальнейшее прессование. Максимальная норма расхода пектолитического ферментного препарата – 0,03 % от массы растительного сырья	жания витамина Р (на 25–30 %) и антицианов (на 18–22 %) в соке. Внедрение «Тренолин Опти ДФ» позволяет увеличить рентабельность производства на 12–15% за счёт снижения потерь сырья.
	Сорта облепихи, произрастающие на юге России: «Дончанка», «Морячка», «Сюрприз Балтики» [13].	Ферментный препарат «Тренолин Опти ДФ».	Сырьё (плоды облепихи) дробят и обрабатывают 15 % ферментом «Тренолин Опти ДФ» в количестве 2 мл на 1 кг. Экспозиция длится от 2 до 6 ч.	Выход полифенолов увеличился на 8–17 % после ферментативного гидролиза препаратом «Тренолин Опти ДФ».
	Виноградные выжимки [23].	Фермент «Целловеридин Г20Х»	Наибольший выход сока из ягод винограда (0,88 л/кг) отмечен при ферментации препаратом Целловеридин Г20Х в концентрации 0,2–0,3 % при температуре 45–50 °C в течение 1–2 ч. Обработанную ферментным препаратом Целловеридин Г20Х виноградную выжимку в дальнейшем пропускают через протирочную машину с отверстиями сита не более 0,75 мм, чтобы отделить случайные примеси и получить более однородную протертую массу, которую смешивают с водой в соотношении 1:1 для получения ягодного пюре.	Содержание витаминов и полифенолов в виноградной выжимке увеличивается в среднем на 7–10%.
	Жом ягод черной смородины [24].	Ферментный препарат Тренолин Термо ДФ	Для черной смородины установлены следующие оптимальные параметры обработки: внесение ферментов в измельченный жом в концентрации 0,1–0,4 % от массы сырья, температурный режим 30–50 °C, продолжительность ферментации – 4 часа.	Обработка ягод черной смородины препаратом Тренолин Термо ДФ увеличивает их антиоксидантный потенциал вдвое.
	Жом ягод черной смородины (сорт Зуша), виноградные выжимки (сорт Молдова) [25].	Ферментный препарат Pectinex BE XXL	Экспериментально установлено, что максимальный выход сока достигается при следующих условиях обработки: температура 30 °C, концентрация ферментного препарата 0,2 % от массы сырья и продолжительность процесса 2 ч. Данные параметры обеспечивают эффективное разрушение клеточных структур ягодной мезги при сохранении термолабильных компонентов, что подтверждается максимальными показателями выхода сока и содержания биологически активных веществ.	Продолжительность фильтрации с использованием Pectinex BE XXL сократилась: для сока из ягод чёрной смородины – в 1,25 раза, а для виноградного – в 1,67 раза.
	Незрелые яблоки [26].	Viscozyme L – мультиферментный комплекс, выделенный из гриба <i>Aspergillus sp.</i>	Оптимальные условия: соотношение Viscozyme L и субстрата составляло 0,0195 (1,95 единиц грибковой бетаглюканазы), температура реакции – 47,12 °C, а время реакции – 12,52 ч.	Содержание общего количества фенолов и кофейной кислоты в образце, обработанном Viscozyme L в 2 и 13 раз выше, чем в контрольном образце.
	Листья дикорастущего растения <i>Cacalia firma</i> [27].	Ферменты Cellic CTec3 HS, Cellulase 1.5 L, Viscozyme L, Pectinex ultrasp-L и Amylase AG.	Оптимальные условия экстракции: температура 47,3 °C, продолжительность 63 ч и pH 3,7 при использовании ферментного препарата Viscozyme L.	Максимальный выход антиоксидантов в 129,7 мг/г.

Несмотря на высокую селективность и экологичность, биохимические методы извлечения полифенольных соединений характеризуются технологи-

ческими ограничениями. К числу наиболее значимых относятся повышенная продолжительность процессов и необходимость строгого контроля технологиче-

ских параметров – температуры, pH среды и концентрации ферментных препаратов. Формирование устойчивых комплексов полифенолов с белковыми компонентами сырья затрудняет стадии последующей очистки экстрактов, а неполная десорбция целевых метаболитов требует дополнительной обработки.

Использование отдельных групп ферментов, в частности карбогидраз, сопряжено с ограниченной эффективностью в отношении сложных полисахаридных матриц растительного происхождения. Кроме того, высокая стоимость коммерческих ферментных композиций остаётся существенным сдерживающим фактором масштабной промышленной реализации метода.

Перспективы развития ферментативных технологий во многом связаны с совершенствованием состава биокатализитических систем, повышением устойчивости ферментов к условиям процесса, а также с интеграцией в многоступенчатые схемы биоаффинирования. В дальнейшем необходимо оптимизировать кинетические и массообменные характеристики экстракции, а также минимизировать ограничения без потери преимуществ биохимических методов – селективности, мягкости условий обработки и высокой адаптивности к различным типам растительного сырья.

Комбинирование методов экстракции

Высокую эффективность извлечения полифенольных соединений из растительного сырья демонстрируют современные комбинированные методы экстракции (таблица 3).

С целью повышения эффективности извлечения полифенолов из растительного сырья используют последовательную жидкостную экстракцию различными растворителями; ультразвуковую экстракцию в сочетании с использованием поверхностно-активных веществ; экстракцию под давлением в сочетании с умеренными температурами, сверхкритическую флюидную экстракцию и др.

Таблица 3 – Сравнительный анализ комбинированных методов экстракции полифенолов из растительного сырья
Table 3 – Comparative analysis of combined methods of polyphenol extraction from plant materials

Методы интенсификации экстракции	Источники полифенолов	Биотехнологические агенты	Описание метода	Эффективность метода	Экологические риски
ЭХА-вода	Солодовая пивная дробина [32, 33].	Фермент Вискофло MG (биокатализаторы целлюлополитического действия): содержит эндо-(1,3-(4)- β -глюканазу, целлюлазу, ксиланазу и другие ферменты.	Использование комбинированного метода: (1) обработка ЭХА-активированной водой (католит с pH 9,6) для деструкции матрицы дробины в течение 24 ч, (2) ферментативный гидролиз препаратом Вискофло MG (2 ч) для расщепления полисахаридов, (3) экстракция 70 % водно-этанольным раствором (50 °C, 60 мин) или пивным дистиллятом при гидромодуле 2:1 для выделения полифенолов, руттина, аминокислот.	Комбинированный способ с ЭХА-водой и биокатализаторами выделяет низкомолекулярные фенольные кислоты и рутин. Увеличивает содержание полифенолов на 60 % и антицианогенов в 3,5 раза.	(1) Остатки этанола: требуют контроля при сбросе сточных вод, но его концентрация в методике невысока. (2) Ферментные отходы: биодеградируемые и нетоксичны. (3) Щелочные гидролизаты (при использовании NaOH) требуют нейтрализации, но в данном методе их применение ограничено.
Ультразвук	Овсяные отруби [34, 35].	Ферменты (а-амилаза, ксиланаза, целлюлаза).	Экстракция включала основные этапы, повторяющиеся трижды: гомогенизацию измельченных отрубей, обработку ферментными препаратами «Амилолюкс А» – а-амилазой, «Глюколюкс А» – глюкоамилазой, «Целлолюкс А», «Амилолюкс А», «Глюкаварин Г18Х» или ультразвуковое воздействие (УЗВ,	Полученные концентраты содержали полифенолы до 67 % от общего их количества в овсяных отрубях ($1,5 \pm 0,2$ %). Основные компоненты: феруловая, галлопро-	(1) Энергопотребление: ультразвуковая обработка, терmostатирование, центрифугирование относятся к энергоемким этапам. (2) Остатки ферментных препаратов: попадают в сточные воды, что

Известно о комплексном использовании ферментов и микроорганизмов. Это позволяет увеличить выход высокомолекулярных полифенолов и улучшить качественные характеристики экстрактов [28].

Интерес представляют комбинации со сверхкритическими жидкостями как экстрагентами, позволяющими осаждать целевые вещества простым изменением температуры или давления [29].

Комбинации ферментов с электролитами демонстрируют повышенную эффективность за счет снижения барьера массопереноса. За счет синергетического эффекта, достигаемого при сочетании ферментативной обработки с рефлексным извлечением в органических растворителях [30], обеспечивается извлечение до 75–85 % целевых биологически активных веществ фенольной природы. Технологический процесс характеризуется оптимальными временными (2–4 часа) и температурными (40–60 °C) параметрами, что способствует сохранению структуры и активности термолабильных соединений.

Контролируемые условия экстракции обеспечивают высокую стабильность полифенолов к окислительным процессам [31].

Перспективным является комбинирование биохимической экстракции с ультразвуковыми и микроволновыми технологиями.

Экономическая целесообразность комбинированных методов подтверждается относительно низкой себестоимостью производства (1200–1500 рублей за килограмм готового экстракта). Дополнительным ограничением служит высокая чувствительность методов к качеству исходного сырья и необходимости его предварительной подготовки.

Комбинированные методы экстракции представляют значительный интерес для фармацевтической, пищевой и косметической промышленности.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИФЕНОЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Методы интенсификации экстракции	Источники полифенолов	Биотехнологические агенты	Описание метода	Эффективность метода	Экологические риски
			35 кГц, 30 мин, при 50 °C, термостатирование (55 °C в течение 3,5 ч) и центрифугирование (4000 об/мин в течение 20 мин). Концентрат биологически активных веществ (БАВ) был получен путем объединения и концентрирования супернатантов второй и третьей стадий экстракции при температуре 60 ± 5 °C в разреженной среде до конечной влажности 30 ± 2 %.	вая и хлорогеновая кислоты.	требует биологической очистки. (3) Водопотребление: трехкратная экстракция ведет к значительному расходу воды. (4) Химические отходы.
	Выжимки из яблока, моркови, ягод (например, из черемухи и смородины) и винограда [36].	Пектиназа (жидкость 10KU) из штамма <i>Aspergillus niger</i>	К 1 г образца добавляли 5 мл пектиназы (85 и/мл), перемешивали и оставляли при температуре 20 °C на 30 мин. Затем экстрагировали (ЕЕА, МЕА или АЕА) в ультразвуковой ванне (US, 25 кГц, 15 мин). Затем суспензию центрифugировали при 3700 об/мин в течение 10 мин, супернатант собирали. Экстракцию повторяли с оставшимся образцом ещё два раза. Все супернатанты объединяли, а объём доводили до 45 мл экстрагентом. Экстракти хранили в морозильной камере при температуре -20 °C до анализа.	Увеличение выхода антиоксидантов составило от 30 % до 50 % по сравнению с экстракцией без ферментов. Ультразвуковая экстракция обеспечивает увеличение выхода полифенолов на 20–25 % по сравнению с традиционным методом водяной бани при продолжительности обработки (30 мин).	(1) Энергопотребление: ультразвуковая обработка, центрифугирование, заморозка относятся к энергоемким этапам. (2) Остатки пектиназы: попадают в сточные воды, что требует дополнительной инактивации. (3) Водопотребление и отходы: трехкратная экстракция ведет к значительному расходу воды. (4) Химические отходы: органические экстрагенты летучие и токсичные.
	Продукты переработки цикория и фенхеля [37].	(1) Препарат «Masterfruit Clear, Corimpex, Romans d'Isanzo, Италия» (пектиназы, полигалактуроназы, пектинэстеразы и арабиназы); (2) Препарат «Endozym Polifruit, AEB, Сан-Поло, Италия» (пектиназы, целлюлазы и кислой протеазы); (3) Кислопектиназа.	Ферментные препараты использовали в соответствии со следующей инструкцией: 1 кг побочного продукта; 10–15 л дистиллированной воды; 0,3 мл ферментного препарата; температура 50 °C; время 90 минут; pH 4. Препараторы корректировалась с помощью молочной кислоты. Препараторы применяли в сочетании с последующей ультразвуковой обработкой в следующих условиях: 100 г/л; 45 °C; 40 минут; 72 Вт.	Ультразвуковая обработка после ферментативной экстракции повысила общее содержание антиоксидантов в цикории (на 12–15 %).	(1) Биологическое загрязнение: риск аллергического влияния на персонал. (2) Ресурсозатратность промышленного выпуска ферментов. (3) Энергопотребление и шумовое загрязнение при использовании ультразвуковой обработки. (4) Отходы: после экстракции снижается их ценность как кормового продукта.
Гидростатическое давление	Виноградные выжимки [38].	Коммерческие ферменты (пектиназа и целлюлаза)	(1) Подготовка сырья: среда состоит из смеси виноградного жома и пшеничных отрубей (1:1). (2) Ферментативная обработка: использовали коммерческие ферменты (пектиназу и целлюлазу) для разрушения клеточных стенок растительной матрицы. (3) ННР-экстракция: обработанные ферментами выжимки подвергали воздействию высокого гидростатического давления (50–200 МПа, 0–30 мин).	Увеличение содержание общих фенолов на 25–40 % по сравнению с традиционными методами	(1) Энергопотребление: высокое гидростатическое давление (ННР) требует значительных энергозатрат, оборудование для ННР требует охлаждения. (2) Коммерческие ферментные препараты производят генно-модифицированными микроорганизмами, что требует контроля безопасности. (3) Отходы: требуют компостирования, термоинактивации.

Методы интенсификации экстракции	Источники полифенолов	Биотехнологические агенты	Описание метода	Эффективность метода	Экологические риски
Микроволновая обработка	Оливковые выжимки (ромасе) [39].	Танназа, комбинация ферментов «танназа, клетулаза и пектиназа»	Параметры микроволновой обработки для экстракции БАВ из оливковой выжимки с использованием ферментов: (1) MEAE-Tan: температура – 60 °C, время – 15 мин, концентрация фермента – 2,34 % (вес/вес), соотношение выжимки и воды – 1:15. (2) MEAE-Tan-Cel-Pec: температура – 46 °C, время – 15 мин, концентрация ферментов – 2 % (вес/вес), соотношение выжимки и воды – 1:20. Для процесса MEAE-Tan-Cel-Pec использовался диапазон микроволновой мощности 70–175 Вт.	Танназа высвобождает хлорогеновую кислоту, а совместное использование ферментов – гидрокситирозол, хлорогеновую и феруловую кислоты.	(1) Энергопотребление: микроволновая обработка требует значительных энергозатрат, ферментативная обработка требует контроля температуры (46–60 °C). (2) Остатки ферментов (танназа, клетулаза и пектиназа) могут попадать в сточные воды. (3) Использование воды (гидромодуль 1:15:1:20). (4) Образование вторичных отходов: выжимка после экстракции не пригодна для использования как кормовая добавка, и требует специальных методов деградации.
Сверхкритическая жидкостная экстракция (диоксид углерода (CO_2))	Люцерна посевная (<i>Medicago sativa L.</i>) [40].	Препараторы целлюлазы (Celluclast® 1.5L, Novozymes) и пектиназы (Pectinex® Ultra SPL, Novozymes).	(1) Предварительная ферментативная обработка листьев люцерны комбинацией целлюлазы (Celluclast® 1.5L, Novozymes) и пектиназы (Pectinex® Ultra SPL, Novozymes) в соотношении 1:1 (50 мг/г сырья, 50 °C, pH 5.0, 2 ч) для деструкции клеточных стенок; (2) сверхкритическая флюидная экстракция (SC-CO_2 , 40 °C, 250 бар, 20 мин) с 10 % этанола в качестве модификатора. Максимальный выход флавоноидов (12.4 мг/г) достигнут при комбинации: ферментация (2 ч, 50 °C) + SFE (250 бар, 40 °C).	Содержание полифенольных соединений в экстракте, полученном после двухэтапной оптимизации, выше (546 ± 21 мкг/г), чем в экстракте, полученном из негидролизованного материала (275 ± 23 мкг/г).	(1) Энергопотребление: сверхкритическая флюидная экстракция требует энергозатрат для поддержания высокого давления, ферментная обработка – для термостабилизации. (2) Использование химических реагентов (этанол). (3) Обращение с отходами и сточные воды.
	Яблочные выжимки [41].	Snailase – комплекс ферментов, полученный из пищеварительного тракта улиток (более 20 ферментов).	Применение фермента snailase в концентрации 0,25 % в течение 2 ч. Последующая сверхкритическая флюидная экстракция с использованием CO_2 с добавлением 10 % метанола в качестве модификатора	Гидролиз сахарных компонентов с конверсией до 96 %. Выход 90 % от общего содержания целевых соединений.	(1) Риски, связанные с ферментом snailase: промышленное производство требует сбора биомассы моллюсков, что может нарушать экологический баланс в местах их обитания. (2) Воздействие сверхкритической CO_2 -экстракции: энергозатраты, метанол. (3) Обращение с отходами: остатки биомассы, рециркуляция CO_2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пищевые отходы промышленного производства являются перспективным источником полифенольных соединений. Полифенольные соединения, благодаря

комплексу своих полезных свойств и биотехнологическому потенциалу, используются как натуральные антиоксиданты, функциональные добавки, активные компоненты лекарственных препаратов и биологически

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИФЕНОЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

активных добавок. Для их извлечения используются различные методы экстракции, высокую эффективность при этом проявляют комбинированные методы.

Сравнительный анализ комбинированных методов экстракции полифенолов из растительного сырья показал, что наиболее перспективными являются: ферментативная экстракция с использованием лигнин-расщепляющих ферментов и экстракцией CO₂, а также ферментативная экстракция с рефлексным извлечением полифенолов в органических растворителях. Эффективность комбинированных методов экстракции достигает 85 % и 90 % соответственно.

Применение современных методов экстракции открывает новые перспективы для переработки растительного сырья. Их дальнейшее развитие направлено на повышение эффективности, совершенствование экономических показателей и расширение области применения [42].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурак Л.Ч., Егорова З.Е. Валоризация отходов переработки растительного сырья как путь достижения целей устойчивого развития // Sciences of Europe. 2024. № 152 (152). С. 13–21. DOI 10.5281/zenodo.14063716.
2. Математическое моделирование рецептуры овсяного печенья, обогащенного продуктами переработки топинамбура / Н.Т. Шамкова, М.Ю. Тамова, А.А. Варивода, Н.С. Шелест // Новые технологии. 2022. Т. 18, № 3. С. 106–117. DOI 10.47370/2072-0920-2022-18-3-106-117. EDN LXKKZM.
3. Modification of protein products from sesame seeds by treatment of electromagnetic fields of extremely low frequencies to optimize functional properties / N.A. Bugaets, S.V. Usatikov, I.V. Tereshchenko [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials (P2ARM 2021), Воронеж, 21–24 сентября 2021 года. Vol. 1052. Воронеж : IOP Publishing Ltd, 2022. P. 012015. DOI 10.1088/1755-1315/1052/1/012015. EDN PJELRK.
4. Щеголева И.Д., Молчанова Е.Н. Отходы чайного производства как дополнительный ресурс биологически активных веществ // Health, Food & Biotechnology. 2020. Т. 2, № 1. С. 153–164. DOI 10.36107/hfb.2020.i1.s297.
5. Полифенолы как перспективные биологически активные соединения / Т.Н. Бобрышева, Г.С. Анисимов, М.С. Золоторева [и др.] // Вопросы питания. 2023. Т. 92, № 1(545). С. 92–107. DOI 10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107.
6. Макарова Н.В., Валиулина Д.Ф., Еремеева Н.Б. Сравнительные исследования методов извлечения биологически активных веществ с антиоксидантными свойствами из косточек винограда (*Vitis vinifera L.*). Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. № 1. С. 140–148. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-140-148>.
7. Зайнитдинов Д.Р., Евтеев А.В., Банникова А.В. Исследование иммобилизации полифенолов овсяных отрубей в комплексные коацерваты сывороточного белка и мальтодекстрина // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50, № 3. С. 460–469. DOI 10.21603/2074-9414-2020-3-460-469.
8. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Биологически активные вещества бузины: свойства, методы извлечения и сохранения // Пищевые системы. 2023. Т. 6, № 1. С. 80–94. DOI 10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94.
9. Попов В.Г., Аксентьева В.В. Получение полифенольных соединений из фитосырья методом микроклонального размножения клеток *in vitro* // Индустрия питания. 2022. Т. 7, № 4. С. 103–110. DOI 10.29141/2500-1922-2022-7-4-12.
10. Бурак Л.Ч., Завалей А.П. Влияние ферментной обработки бузины, произрастающей в Республике Беларусь на антиоксидантную активность сока // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2020. № 3. С. 78–87. DOI 10.24411/2311-6447-2020-10065.
11. Влияние ферментативной обработки мезги на содержание фенольных веществ в вишневых натуральных и спиртованных соках и их стабильность / Э.Р. Мамдов, Е.Г. Солодченко, А.А. Токбаева, Н.В. Баракова // Вестник Международной академии холода. 2020. № 3. С. 52–57. DOI 10.17586/1606-4313-2020-19-3-52-57.
12. Ферментативный гидролиз морских бурых водорослей *Ascophyllum nodosum* и *Undaria pinnatifida*: подбор условий для эффективного извлечения полифенолов / О.В. Табакаева, С.В. Капуста, А.В. Табакаев, С.Л. Тихонов // Вестник ВГСГУТУ. 2025. № 1(96). С. 43–54. DOI 10.53980/24131997_2025_1_43.
13. Биотрансформация химических компонентов плодов облепихи под действием ферментного препарата Тренолин опти ДФ / Т.Г. Причко, Н.В. Дрофичева, И.А. Мачнева, Т.Л. Смелик // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2022. № 74(2). С. 254–264. DOI 10.30679/2219-5335-2022-2-74-254-264.
14. Хасанов А.Р., Баракова Н.В. Исследование влияния дозы внесения ферментных препаратов на выход полифенольных веществ и антоцианов в плодово-ягодных и овощных соках // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83, № 2(88). С. 61–66. DOI 10.20914/2310-1202-2021-2-61-66.
15. Влияние ферментативной обработки на процесс производства спиртованных морсов из сущеного сырья / Е.В. Воробьевая, И.М. Абрамова, Н.Е. Головачева [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. 2018. № 2. С. 28–33. EDN XURRXN.
16. Еремеева Н.Б., Макарова Н.В. Изучение содержания антиоксидантов и их активности в концентрированных экстрактах из ягод клюквы (*Vaccinium Oxycoccosus*), облепихи (*Hippophae rhamnoides L.*), ежевики (*Rubus fruticosus*), калины (*Viburnum opulus L.*) и рябины (*Sorbus aucuparia L.*) // Химия растительного сырья. 2021. № 4. С. 157–164. DOI 10.14258/jcprmt.2021049365. EDN ZHPGJC.
17. Влияние ферментных препаратов на качественные показатели сброженных соков рябины черноплодной / Н.К. Шелковская, Е.П. Каменская, Е.С. Дикалова, М.Н. Колесниченко // Ползуновский вестник. 2022. № 3. С. 14–21. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.002.
18. Stanek-Widera N., Krzyżowska A., Zarębska M., Wrona D., Kapusta I. Evaluation of Cellulase, Pectinase, and Hemicellulase Effectiveness in Extraction of Phenolic Compounds from Grape Pomace // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Т. 25, № 24. С. 13538. DOI: 10.3390/ijms252413538.
19. Ramires F.A., Bavarro A.R., D'Antuono I. [et al.]. Liquid submerged fermentation by selected microbial strains for onion skins valorization and its effects on polyphenols. World J Microbiol Biotechnol 39, 258 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03708-y>.
20. Marchut-Mikołajczyk O., Chlebicz M., Kawecka M. [et al.]. Endophytic bacteria isolated from *Urtica dioica L.* – preliminary screening for enzyme and polyphenols production. Microb Cell Fact 22, 169 (2023). <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02167-2>.
21. Аль-ясири Аркан Хади, Баракова Н.В., Басковцева А. С., Рим Алхатиб, Новоселов А.Г. Эффективность применения ферментных препаратов при водной экстракции фенольных веществ из листьев зеленого чая // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппа-

- раты пищевых производств». 2024. №1 (59). С. 35–42. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-35-43.
22. Дрофичева Н.В. Оптимизация биотехнологических процессов при производстве вишневого сока с использованием пектолитических ферментных препаратов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2022. № 5(389). С. 10–13. DOI 10.26297/0579-3009.2022.5.2. EDN NLBJL1.
23. Дрофичева Н.В. Использование вторичного сырья переработки винограда в технологии производства функциональных продуктов питания // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2021. № 69(3). С. 326–336. DOI 10.30679/2219-5335-2021-3-69-326-336. EDN QRYHSZ.
24. Дрофичева Н.В. Влияние ферментного препарата Тренолин Термо ДФ на выход биологически активных веществ из ягод смородины черной // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2020. № 64(4). С. 323–333. DOI 10.30679/2219-5335-2020-4-64-323-333. EDN IGYFIO.
25. Дрофичева Н.В. Влияние ферментного препарата Pectinex BE XXL на физико-биохимические процессы, происходящие в ягодном сырье // Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия. 2020. Т. 28. С. 177–181. DOI 10.30679/2587-9847-2020-28-177-181. EDN QOBWYB.
26. Zheng H.Z., Hwang I.W., Kim S.K. [et al.]. Optimization of carbohydrate-hydrolyzing enzyme aided polyphenol extraction from unripe apples. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 53, 342–350 (2010). <https://doi.org/10.3839/jksabc.2010.053>.
27. Ha S.-Y., Kim H.-C. & Yang J.-K. (2025). Enzymatic Hydrolysis-Derived Water-Soluble Carbohydrates from Cacalia firma: Evaluation of Antioxidant Properties. *Foods*, 14(8), 1326. <https://doi.org/10.3390/foods14081326>.
28. Yılmaz B., Mortsas H., Varlı S.N. Ağagündüz D. (2024). Metabolic Engineering of Lactic Acid Bacteria and Yeasts for the Production of Compounds with Industrial Applications. In: Ceresino, E.B., Juodeikiene, G., Miescher Schwenninger, S., Ferreira da Rocha, J.M. (eds) Sourdough Microbiota and Starter Cultures for Industry. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48604-3_8.
29. Меньшутина Н.В., Казеев И.В., Артемьев А.И., Бочарова О.А., Худеев И.И. Применение сверхкритической экстракции для выделения химических соединений. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2021. Т. 64. Вып. 6. С. 4–19. 10.6060/ivkkt.20216406.6405.
30. Современные исследования в области интенсификации процесса экстракции биологически активных веществ из растительного сырья с применением ферментов / Фабрицкая А.А. [и др.] // Новые технологии. 2021. Т. 17, № 2. С. 56–66. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-2-56-66>.
31. Kokkinomagoulos E., Kallithraka S., Tzourou I., Kefalas P., Kanelloupolou A., Dourtoglou V. (2022). Enzymatic treatment of brewer's spent grain and olive pomace to enhance antioxidant extraction under controlled fermentation conditions // *Biotechnology Letters*, 44 (12), 1261–1270. DOI: 10.1007/s10529-022-03276-7.
32. Кобелев К.В. Разработка инновационного способа получения биологически активных соединений пивной дробины / К.В. Кобелев, М.В. Гернет, И.Н. Грибкова // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51, № 1. С. 113–124. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-113-124>.
33. Анализ возможностей извлечения органических соединений пивной дробины различными способами / И.Н. Грибкова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 3. С. 469–489. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2383>.
34. Разработка биотехнологии получения фитовеществ из вторичных продуктов переработки зерна / А.В. Битюкова, А.А. Амелькина, А.В. Евтеев [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2019. Т. 49, № 1. С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-5-13>.
35. Зяйнитдинов Д.Р. Исследование иммобилизации полифенолов овсяных отрубей в комплексные коацерваты сывороточного белка и мальтодекстрина / Д.Р. Зяйнитдинов, А.В. Евтеев, А.В. Банникова // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50, № 3. С. 460–469. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-460-469>.
36. Wiedemair V., Zlöbl D. & Bach K. Application of a Designed Mixed Model Approach for Antioxidant Extraction from Pomace. *Food Anal. Methods* 16, 1347–1357. (2023). <https://doi.org/10.1007/s12161-023-02507-3>.
37. Baiano A., Fiore A. Enzymatic-Assisted Recovery of Antioxidants from Chicory and Fennel by-Products. *Waste Biomass Valor* 16, 957–969 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02723-w>.
38. Cascaes Teles A.S., Hidalgo Chávez D.W., Zarur Coelho M.A., Rosenthal A., Fortes Gottschalk L.M., Tonon R.V. Combination of enzyme-assisted extraction and high hydrostatic pressure for phenolic compounds recovery from grape pomace // *J. Food Eng.* 2021. Vol. 288. Article ID 110128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110128>.
39. Macedo G.A., Barbosa P.P.M., Dias F.F.G., Crawford L.M., Wang S.C., Bell J.M.L.N.M. Optimizing the Integration of Microwave Processing and Enzymatic Extraction to Produce Polyphenol-Rich Extracts from Olive Pomace. *Foods*. 2023 Oct 12;12(20):3754. doi: 10.3390/foods12203754. PMID: 37893645; PMCID: PMC10606511.
40. Krakowska-Sieprawska A. [et al.]. Enzyme-Assisted Supercritical Fluid Extraction of Flavonoids from Medicago Sativa Leaves // *Materials* (Basel). 2021. 14(11):2724. DOI: 10.3390/ma14112724.
41. Mikšovský P., Korpíntner C., Parandeh Z., Goessinger M., Bica-Schröder K., Halbwirth H. Enzyme-Assisted Supercritical Fluid Extraction of Flavonoids from Apple Pomace (*Malus×domestica*). *Chem Sus Chem*. 2024 Apr 8;17(7):e202301094. doi: 10.1002/cssc.202301094. Epub 2024 Jan 22. PMID: 38084785.
42. Moro K.I.B., Bender A.B.B., da Silva, L.P. [et al.]. Green Extraction Methods and Microencapsulation Technologies of Phenolic Compounds From Grape Pomace: A Review. *Food Bioprocess Technol* 14, 1407–1431. (2021). <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02665-421>.

Информация об авторах

И. Н. Кобзарь – аспирант кафедры «Общественного питания и сервиса» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет».

Н. А. Бугаец – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Общественного питания и сервиса» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет».

Н. Т. Шамкова – доктор технических наук, профессор кафедры «Общественного питания и сервиса» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет».

REFERENCES

- Burak, L.C. & Egorova, Z.E. (2024). Valorization of plant processing waste as a pathway to achieving sustainable development goals. *Sciences of Europe*, 152(152), 13–21. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14063716>.
- Shamkova, N.T., Tamova, M.Y., Varivoda, A.A. & Shelest, N.S. (2022). Mathematical modeling of oatmeal cookie recipes enriched with Jerusalem artichoke processing products. *New Technologies*, 18(3), 106–117. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-3-106-117>.
- Bugaets, N.A., Usatikov, S.V., Tereshchenko, I.V. [et al.]. (2022). Modification of protein products from sesame seeds by treatment of electromagnetic fields of extremely low frequencies to optimize functional properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1052, 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1052/1/012015>.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИФЕНОЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

4. Shchegoleva, I.D. & Molchanova, E.N. (2020). Tea production waste as an additional source of biologically active substances. *Health, Food & Biotechnology*, 2(1), 153-164. <https://doi.org/10.36107/hfb.2020.i1.s297>.
5. Bobrysheva, T.N., Anisimov, G.S., Zolotoreva, M.S. [et al.]. (2023). Polyphenols as promising biologically active compounds. *Nutrition Issues*, 92(1), 92-107. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107>.
6. Makarova, N.V., Valiulina, D.F. & Eremeeva, N.B. (2020). Comparative studies of methods for extracting biologically active substances with antioxidant properties from grape seeds (*Vitis vinifera* L.). *University News. Applied Chemistry and Biotechnology*, 10(1), 140-148. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-140-148>.
7. Zyaynidinov, D.R., Evteev, A.V. & Bannikova, A.V. (2020). Study of immobilization of oat bran polyphenols in complex coacervates of whey protein and maltodextrin. *Food Processing: Techniques and Technology*, 50(3), 460-469. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-460-469>.
8. Burak, L.C. & Sapach, A.N. (2023). Biologically active substances of elderberry: Properties, extraction and preservation methods. *Food Systems*, 6(1), 80-94. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94>.
9. Popov, V.G. & Aksentyeva, V.V. (2022). Production of polyphenolic compounds from plant materials by microclonal propagation of cells in vitro. *Food Industry*, 7(4), 103-110. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2022-7-4-12>.
10. Burak, L.C. & Zavalei, A.P. (2020). Effect of enzymatic treatment of elderberry growing in the Republic of Belarus on the antioxidant activity of juice. *Technologies of Food and Processing Industry of AIC - Healthy Food Products, 3*, 78-87. DOI 10.24411/2311-6447-2020-10065.
11. Mamedov, E.R., Solodchenko, E.G., Tokbaeva, A.A. & Barakova, N.V. (2020). Effect of enzymatic treatment of pulp on the content of phenolic substances in natural and alcoholized cherry juices and their stability. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, 3, 52-57. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2020-19-3-52-57>.
12. Tabakaeva, O.V., Kapusta, S.V., Tabakaev, A.V. & Tikhonov, S.L. (2025). Enzymatic hydrolysis of brown seaweeds *Ascophyllum nodosum* and *Undaria pinnatifida*: Selection of conditions for effective polyphenol extraction. *Bulletin of VSTU*, 1(96), 43-54. https://doi.org/10.53980/24131997_2025_1_43.
13. Pritsko, T.G., Drobicheva, N.V., Machneva, I.A. & Smelik, T.L. (2022). Biotransformation of chemical components of sea buckthorn fruits under the action of Trenolin Opti DF enzyme preparation. *Fruit Growing and Viticulture of the South of Russia*, 74(2), 254-264. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2022-2-74-254-264>.
14. Khasanov, A.R. & Barakova, N.V. (2021). Study of the effect of enzyme preparation dosage on the yield of polyphenolic substances and anthocyanins in fruit-berry and vegetable juices. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*, 83(2), 61-66. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-2-61-66>.
15. Vorobieva, E.V., Abramova, I.M., Golovacheva, N.E. [et al.]. (2018). Effect of enzymatic treatment on the production of alcoholized fruit drinks from dried raw materials. *Storage and Processing of Farm Products*, 2, 28-33. EDN XURRXN.
16. Eremeeva, N.B. & Makarova, N.V. (2021). Study of antioxidant content and activity in concentrated extracts from cranberries (*Vaccinium oxycoccus*), sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.), blackberries (*Rubus fruticosus*), viburnum (*Viburnum opulus* L.) and rowan (*Sorbus aucuparia* L.). *Chemistry of Plant Raw Material*, 4, 157-164. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049365>.
17. Shelkovskaya, N.K., Kamenskaya, E.P., Dikalova, E.S. & Kolesnichenko, M.N. (2022). Effect of enzyme preparations on quality indicators of fermented chokeberry juices. *Polzunovsky Bulletin*, 3, 14-21. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.002>.
18. Stanek-Widera, N., Krzyżowska, A., Zarębska, M., Wrona, D. & Kapusta, I. (2024). Evaluation of cellulase, pectinase, and hemicellulase effectiveness in extraction of phenolic compounds from grape pomace. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(24), 13538. <https://doi.org/10.3390/ijms252413538>.
19. Ramires, F.A., Bavarro, A.R., D'Antuono, I., Mentana, A., Natrella, G., Gambacorta, G. & Faccia, M. (2023). Liquid submerged fermentation by selected microbial strains for onion skins valorization and its effects on polyphenols. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(8), 258. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03708-y>.
20. Marchut-Mikołajczyk, O., Chlebicz, M., Kawecka, M., Kwapisz, E. & Wierzbicka-Woś, A. (2023). Endophytic bacteria isolated from *Urtica dioica* L. - preliminary screening for enzyme and polyphenols production. *Microbial Cell Factories*, 22(1), 169. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02167-2>.
21. Al-Yasari Arkan Hadi, Barakova, N.V., Baskovtseva, A.S., Alhatib, R. & Novoselov, A.G. (2024). Efficiency of enzyme preparations application in aqueous extraction of phenolic compounds from green tea leaves. *Scientific Journal of ITMO University. Series: Processes and Food Production Equipment*, 1(59), 35-42. <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2024-17-1-35-43>.
22. Drobicheva, N.V. (2022). Optimization of biotechnological processes in cherry juice production using pectinolytic enzyme preparations. *News of Higher Educational Institutions. Food Technology*, 5(389), 10-13. <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2022.5.2>.
23. Drobicheva, N.V. (2021). Use of grape processing by-products in functional food production technology. *Fruit Growing and Viticulture of the South of Russia*, 69(3), 326-336. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2021-3-69-326-336>.
24. Drobicheva, N.V. (2020). Effect of Trenolin Thermo DF enzyme preparation on the yield of biologically active substances from black currant berries. *Fruit Growing and Viticulture of the South of Russia*, 64(4), 323-333. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2020-4-64-323-333>.
25. Drobicheva, N.V. (2020). Effect of Pectinex BE XXL enzyme preparation on physicochemical processes occurring in berry raw materials. *Scientific Works of the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Winemaking*, 28, 177-181. <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2020-28-177-181>.
26. Zheng, H.Z., Hwang, I.W., Kim, S.K. & Chung, S.K. (2010). Optimization of carbohydrate-hydrolyzing enzyme aided polyphenol extraction from unripe apples. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 53(3), 342-350. <https://doi.org/10.3839/jksabc.2010.053>.
27. Ha, S.-Y., Kim, H.-C. & Yang, J.-K. (2025). Enzymatic hydrolysis-derived water-soluble carbohydrates from Cacalia firma: Evaluation of antioxidant properties. *Foods*, 14(8), 1326. <https://doi.org/10.3390/foods14081326>.
28. Yılmaz, B., Mortsal, H., Varlı, S.N. & Ağagündüz, D. (2024). Metabolic engineering of lactic acid bacteria and yeasts for the production of compounds with industrial applications. In E.B. Ceresino, G. Juodeikiene, S. Miescher Schwenninger & J.M. Ferreira da Rocha (Eds.), *Sourdough microbiota and starter cultures for industry* (pp. 139-156). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48604-3_8.
29. Menshutina, N.V., Kazeev, I.V., Artemiev, A.I., Bocharova, O.A. & Khudeev, I.I. (2021). Application of supercritical extraction for isolation of chemical compounds. *University News. Chemistry and Chemical Technology*, 64(6), 4-19. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216406.6405>.
30. Fabritskaya, A.A., Ivanova, S.A., Petrov, V.G. & Smirnova, O.V. (2021). Modern research in the field of intensification of the extraction process of biologically active substances from plant materials using enzymes. *New*

- Technologies*, 17(2), 56-66. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-2-56-66>.
31. Kokkinomagoulos, E., Kallithraka, S., Tzourou, I., Kefalas, P., Kanellopoulou, A. & Dourtoglou, V. (2022). Enzymatic treatment of brewer's spent grain and olive pomace to enhance antioxidant extraction under controlled fermentation conditions. *Biotechnology Letters*, 44(12), 1261-1270. <https://doi.org/10.1007/s10529-022-03276-7>.
32. Kobelev, K.V., Gernet, M.V. & Gribkova, I.N. (2021). Development of an innovative method for obtaining biologically active compounds from brewer's spent grain. *Food Processing: Techniques and Technology*, 51(1), 113-124. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-113-124>.
33. Gribkova, I.N., Kobelev, K.V., Gernet, M.V. & Petrova, I.A. (2022). Analysis of possibilities for extracting organic compounds from brewer's spent grain by various methods. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(3), 469-489. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2383>.
34. Bityukova, A.V., Amelkina, A.A., Evteev, A.V., Zayniddinov, D.R. & Bannikova, A.V. (2019). Development of biotechnology for obtaining phytochemicals from grain processing by-products. *Food Processing: Techniques and Technology*, 49(1), 5-13. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-5-13>.
35. Zayniddinov, D.R., Evteev, A.V. & Bannikova, A.V. (2020). Study of immobilization of oat bran polyphenols in complex coacervates of whey protein and maltodextrin. *Food Processing: Techniques and Technology*, 50(3), 460-469. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-460-469>.
36. Wiedemair, V., Zlöbl, D. & Bach, K. (2023). Application of a designed mixed model approach for antioxidant extraction from pomace. *Food Analytical Methods*, 16(7), 1347-1357. <https://doi.org/10.1007/s12161-023-02507-3>.
37. Baiano, A. & Fiore, A. (2025). Enzymatic-assisted recovery of antioxidants from chicory and fennel by-products. *Waste and Biomass Valorization*, 16(3), 957-969. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02723-w>.
38. Cascaes Teles, A.S., Hidalgo Chávez, D.W., Zarur Coelho, M.A., Rosenthal, A., Fortes Gottschalk, L.M. & Tonon, R.V. (2021). Combination of enzyme-assisted extraction and high hydrostatic pressure for phenolic compounds recovery from grape pomace. *Journal of Food Engineering*, 288, 110128. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110128>.
39. Macedo, G.A., Barbosa, P.P. M., Dias, F.F.G., Crawford, L.M., Wang, S.C. & Bell, J.M.L.N.M. (2023). Optimizing the integration of microwave processing and enzymatic extraction to produce polyphenol-rich extracts from olive pomace. *Foods*, 12(20), 3754. <https://doi.org/10.3390/foods12203754>.
40. Krakowska-Sieprawska, A., Rafińska, K., Walczak-Skierska, J., Kielbasa, A. & Buszewski, B. (2021). Enzyme-assisted supercritical fluid extraction of flavonoids from *Medicago sativa* leaves. *Materials*, 14(11), 2724. <https://doi.org/10.3390/ma14112724>.
41. Mikšovský, P., Kornpointner, C., Parandeh, Z., Goessinger, M., Bica-Schröder, K. & Halbwirth, H. (2024). Enzyme-assisted supercritical fluid extraction of flavonoids from apple pomace (*Malus × domestica*). *ChemSusChem*, 17(7), e202301094. <https://doi.org/10.1002/cssc.202301094>.
42. Moro, K.I.B., Bender, A.B.B., da Silva, L.P. & Penna, N.G. (2021). Green extraction methods and microencapsulation technologies of phenolic compounds from grape pomace: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 14(8), 1407-1431. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02665-4>.

Information about the authors

I.N. Kobzar - full-time postgraduate student in the scientific specialty 4.3.3 Food Systems (technical sciences) at the Department of Public Catering and Service, Kuban State Technological University.

N.A. Bugayets - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Public Catering and Service, Kuban State Technological University.

N.T. Shamkova - Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Public Catering and Service, Kuban State Technological University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.