

Наталья Алексеевна Бугаец^{1✉}, Наталья Тимофеевна Шамкова², Иван Николаевич Кобзарь³, Кирилл Яковлевич Кечин⁴

^{1,2,3,4}Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

¹kubanochka23@yandex.ru

²shamkova75@yandex.ru

³ivan.kobzar.00@mail.ru

⁴cyrilkechin@gmail.com

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ЭКСТРАКЦИИ ПОЛИФЕНОЛОВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Цель исследования – анализ и выявление эффективных технологий получения полифенольных соединений из растительного сырья для дальнейшего их применения в производстве функциональных продуктов питания. Исследование проводилось в период 2020–2025 гг. на основе анализа 70 научных публикаций из международных баз данных (PubMed, Science Direct, Springer Science) и российских электронных библиотек (eLibrary, РИНЦ, Scholar). Проанализированы различные методы экстракции полифенолов: физические (включая ультразвуковую, микроволновую, сверхкритическую жидкостную экстракцию); химические (с использованием органических растворителей); комбинированные. Выявлены основные преимущества и ограничения различных технологий экстракции. Распространенные в настоящее время традиционные методы экстракции характеризуются высоким расходом органических растворителей, длительностью процесса, невозможностью точного контроля параметров и др. Развитие инновационных технологий экстракции направлено на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду при сохранении высокой эффективности процесса. Определена эффективность различных методов экстракции, %: сверхкритическая жидкостная экстракция – 64; ультразвуковая экстракция – 58; микроволновая экстракция – 37; мембранная технология – 75; традиционная экстракция кипячением – 50. Наиболее результативной с точки зрения извлечения и сохранности полифенольных веществ является сверхкритическая жидкостная экстракция (до 95 % извлечения) с последующей сублимационной сушкой. Наибольший практический интерес представляют комбинированные методы экстракции, сочетающие высокую эффективность, экологичность и экономическую целесообразность. Дальнейшее развитие современных технологий экстракции полифенольных соединений из растительного сырья направлено на повышение их эффективности, совершенствование экономических показателей и расширение области применения.

Ключевые слова: полифенолы, экстракция растительного сырья, физические методы экстракции, химические методы экстракции, комбинированные методы экстракции, биоактивные вещества

Для цитирования: Бугаец Н.А., Шамкова Н.Т., Кобзарь И.Н., и др. Сравнительный анализ технологий экстракции полифенолов из растительного сырья // Вестник КрасГАУ. 2025. № 11. С. 281–297. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11-281-297.

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».

Natalia Alekseevna Bugaets^{1✉}, Natalia Timofeevna Shamkova², Ivan Nikolaevich Kobzar³, Kirill Yakovlevich Kechin⁴

^{1,2,3,4}Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

¹kubanochka23@yandex.ru

²shamkova75@yandex.ru

³ivan.kobzar.00@mail.ru

⁴cyrilkechin@gmail.com

COMPARATIVE ANALYSIS OF POLYPHENOL EXTRACTION TECHNOLOGIES FROM PLANT RAW MATERIALS

The objective of the study is to analyze and identify effective technologies for obtaining polyphenolic compounds from plant materials for their subsequent use in the production of functional foods. The study was conducted from 2020 to 2025 and was based on an analysis of 70 scientific publications from international databases (PubMed, Science Direct, Springer Science) and Russian electronic libraries (eLibrary, Russian Science Citation Index, Scholar). Various methods of polyphenol extraction were analyzed: physical (including ultrasonic, microwave, and supercritical fluid extraction); chemical (using organic solvents); and combined methods. The main advantages and limitations of various extraction technologies were identified. Currently widespread traditional extraction methods are characterized by high consumption of organic solvents, lengthy process times, the inability to precisely control parameters, etc. The development of innovative extraction technologies is aimed at minimizing the negative impact on the environment while maintaining high process efficiency. The efficiency of various extraction methods was determined in %: supercritical fluid extraction – 64; ultrasonic extraction – 58; microwave extraction – 37; membrane technology – 75; traditional boiling extraction – 50. The most effective in terms of extraction and preservation of polyphenolic substances is supercritical fluid extraction (up to 95 % extraction) followed by freeze-drying. It was established that combined extraction methods, combining high efficiency, environmental friendliness and economic feasibility, are of the greatest practical interest. Further development of modern technologies for the extraction of polyphenolic compounds from plant raw materials is aimed at increasing their efficiency, improving economic indicators and expanding the scope of application.

Keywords: polyphenols, plant material extraction, physical extraction methods, chemical extraction methods, combined extraction methods, bioactive substances

For citation: Bugayets NA, Shamkova NT, Kobzar IN, et al. Comparative analysis of polyphenol extraction technologies from plant raw materials. *Bulletin of KSAU*. 2025;(11):281-297. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11-281-297.

Funding: the study was supported by grant No. 25-16-20071 from the RSF and the KSF, "Research and Development of Specialized Food Modules Based on Phenolic and Protein Compounds for the Purpose of Obtaining Food Products for the Prevention of Nutrition-Related Diseases".

Введение. Одним из ключевых направлений развития пищевой промышленности является создание функциональных продуктов питания, способствующих улучшению структуры питания населения различных возрастных групп, сохранению здоровья и профилактике широко распространенных заболеваний [1]. Особую роль в составе функциональных продуктов питания играют соединения с антиоксидантной активностью – полифенолы. В эту группу входят фенольные кислоты, флавоноиды, проантоцианидины, антоцианы, стильбены [1–3]. Многочисленные исследования подтверждают, что пищевые по-

лифенолы оказывают положительное влияние на метаболизм, поддерживают антиоксидантный статус и функционирование сердечно-сосудистой системы, способствуют снижению риска развития ожирения, атеросклероза, диабета, гипертонии, нейродегенеративных заболеваний, повышают устойчивость организма к онкологическим заболеваниям [4, 5].

Для получения высококачественных соединений полифенольной природы важно выбрать эффективный метод их извлечения. Для этого используются различные технологии, основывающиеся на физических, химических, биохимических

мических методах. К технологиям экстракции предъявляются комплексные требования экологичности, экономической целесообразности и высокой эффективности.

Существующие технологии получения полифенольных веществ из растительного сырья имеют определенные достоинства и недостатки.

Исследование направлено на сравнительный анализ научно-технических и патентных данных, касающихся методов экстракции полифенольных соединений из растительного сырья.

Цель исследования – 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.

Объекты и методы. Для проведения комплексного анализа были отобраны 67 научных публикаций, найденные в международных базах данных (PubMed, Science Direct, Springer Science) и российских научных электронных библиотеках (eLibrary, РИНЦ, Scholar). Поиск литературы осуществлялся с использованием следующих ключевых терминов: «полифенолы», «экстракция флавоноидов», «методы экстракции», «фенольные соединения», «технология извлечения полифенолов», «проантоцианидины».

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 2020–2025 гг.

Результаты и их обсуждение. Распространенные в настоящее время традиционные методы экстракции характеризуются высоким расходом органических растворителей, длительностью процесса, невозможностью точного контроля параметров и др. Совершенствование существующих и развитие инновационных технологий экстракции направлено на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду при сохранении высокой эффективности процесса.

Физические методы. Экстракция по Сокслету сохраняет свою актуальность как референтный стандарт при оценке эффективности экстракционных технологий [6, 7].

Современные технологии экстракции включают: ультразвуковую экстракцию (UAE), микроволновую экстракцию (MAE), сверхкритическую жидкостную экстракцию (SFE), жидкостную экстракцию под давлением (PEF). Перспективны обработка высоким давлением (HPP), импульсное электрическое поле (PEF), УФ-излучение и гидродинамическая кавитация (HC), демонстрирующие эффективность в сохранении нутриентного и фитохимического профиля растительных экстрактов [8, 9].

Сравнительная характеристика физических методов экстракции полифенолов из растительного сырья приведена в таблице 1.

К современным технологиям экстракции относится использование субкритической воды и реактора из нержавеющей стали. Субкритическая вода определяется как жидкая фаза при температуре 100–374 °С и давлении до 218 атмосфер, что обеспечивает ее особые экстракционные свойства.

Экспериментальная методика включает: помещение 0,5 г измельченного образца (фракция 0,5–3,0 мм) с 7 мл дистиллированной воды в автоклав; герметизацию и нагрев до заданной температуры (120–220 °С, точность ± 1 °С) в течение 60 мин; быстрое охлаждение до комнатной температуры (15 мин); фильтрацию через бумажный фильтр с последующей промывкой 70 % этанолом. Свободный объем в реакторе обеспечивал установление равновесного давления паров воды, соответствующего температуре экстракции (например 1,55 МПа при 200 °С) [10].

Полученные фильтраты подвергали сушке при температуре, не превышающей 50 °С, с принудительной вентиляцией для получения сухих экстрактов. Для последующего анализа антиоксидантной активности *in vitro*, количественного определения суммы полифенолов и флавоноидов в листьях оливы сухие экстракты ресуспендировали в 70 % этаноле (концентрация 1 мг/мл) [11].

При исследовании экстракции из листьев *Ginkgo biloba* применяли метод субкритической водной экстракции в температурном диапазоне 100–220 °С. Данная методика демонстрирует двойное преимущество: не только повышает

выход вторичных метаболитов, но и позволяет модифицировать фитохимический профиль получаемых экстрактов [12].

Для ультразвуковой экстракции полифенолов использовали аппарат PEX 3 Sonifier со следующими характеристиками: рабочий объем из нержавеющей стали – 3 л (23×13.7 см); частота ультразвука – 25 кГц; выходная мощность – 150 Вт; удельная мощность в среде ~60 Вт/кг (калориметрически измеренная). Система оснащена двухконтурной системой термостатирования [13].

Для экстракции полифенолов из виноградных косточек использовали ультразвуковой реактор с параметрами: рабочая частота – 33,5 кГц; акустическое давление – 0,4–0,5 МПа; температурный режим – 30–40 °С (контролируемый). Экспериментально установлено, что выход экстракта нелинейно зависит от времени и интенсивности обработки. Основными механизмами являются: кавитация, пульсация, механические колебания. Оптимальные параметры экстракции: время – 60 мин; удельная мощность – 26,4 Вт/л. Дальнейшее увеличение параметров обработки не дает значимого прироста выхода при снижении экономической эффективности процесса. Визуальная оценка цветности экстрактов подтвердила полученные количественные зависимости [14].

Положительно зарекомендовала себя лиофилизация термолабильных биоактивных соединений, обеспечивающая сохранение физико-химических характеристик целевых соединений, включая морфологические свойства, органолептические показатели и структурные особенности [15].

Полифенольные соединения, извлеченные современными физическими методами, находят широкое применение в различных отраслях промышленности.

Сверхкритическая жидкостная экстракция (SFE) с использованием CO₂ позволяет получать соединения, востребованные в пищевой промышленности в качестве натуральных красителей, консервантов и антиоксидантов для функциональных продуктов. В фармацевтической отрасли эти экстракты применяют при создании препаратов с антиоксидантной и противовоспалительной активностью, средств для профилактики сердечно-сосудистых патологий. Косметическая промышленность использует их

в антивозрастных средствах и продуктах с УФ-защитными свойствами [16].

Ультразвуковая экстракция характеризуется сокращенным временем процесса и возможностью работы при пониженных температурах, что особенно важно для термолабильных соединений [8].

Ультразвуковая экстракция (UAE) дает возможность получения биологически активных соединений для фармацевтических препаратов, включая кардиопротекторы, нейропротекторы и противоопухолевые средства. В пищевой промышленности такие экстракты служат натуральными антиоксидантами и консервантами, а в косметологии входят в состав средств по уходу за кожей и волосами. Особый интерес представляет их применение в биомедицине для создания биосенсоров и систем доставки лекарств, в сельском хозяйстве – в качестве экологических фунгицидов и биостимуляторов [17].

Микроволновая экстракция (MAE) преимущественно используется для обогащения пищевых продуктов, включая функциональные напитки и специализированные продукты для спортивного питания. Экстракция с ИК-излучением находит применение при производстве натуральных красителей и антиоксидантных комплексов. Традиционные методы кипячения сохраняют свою актуальность при изготовлении лекарственных форм и косметических ингредиентов [18].

Мембранные технологии обеспечивают получение высокоочищенных экстрактов для фармацевтической промышленности, включая противоопухолевые и противовоспалительные препараты. Субкритическая водная экстракция (PEF) дает соединения, востребованные в нутрицевтиках и средствах защиты кожи от окислительного стресса. Лيوфилизация позволяет сохранить термолабильные соединения для медицинских и косметических применений [19].

Инновационные методы обработки, такие как высокое давление (HPP) и импульсное электрическое поле (PEF), находят применение при производстве функциональных продуктов с сохранением питательных веществ. УФ-экстракты используются в средствах для восстановления кожи, а технологии гомогенизации под высоким давлением (HPH) и гидродинамической кавитации (HC) позволяют получать стабильные биологически активные соединения для различных промышленных применений [20, 21].

Таблица 1

Сравнительная характеристика физических методов экстракции полифенолов из растительного сырья
Comparative Characteristics of Physical Methods for Extracting Polyphenols from Plant Raw Materials

Метод экстракции	Описание метода	Эффективность экстракции, %	Время экстракции, мин	Температура экстракции, °C	Растворитель	Стабильность полифенолов	Источник
Сверхкритическая CO ₂ -экстракция (SFE)	Экстракция при 35–45 °C и 150–300 бар; высокая селективность и сохранение антиоксидантной активности	64–75	30–60 мин	35–45	CO ₂ + 5–10 % этанола	Высокая	[22–24]
Ультразвуковая экстракция (UAE)	Кавитация разрушает клеточные стенки, усиливая выход полифенолов	50–68	20–60 мин	30–50	Вода, этанол	Средняя	[8, 14, 25–27]
Микроволновая экстракция (MAE)	Быстрый нагрев матрицы и растворителя под действием микроволн, интенсификация диффузии	30–55	10–20 мин	50–80	Этанол, вода	Средняя	[28–30]
Субкритическая водная экстракция (SWE / PHWE)	Вода при 120–220 °C и давлении 10–20 бар; улучшенная растворяющая способность	40–70	30–60 мин	120–200	Вода	Высокая	[10–12, 31–33]
Гидродинамическая кавитация (HC)	Образование/схлопывание пузырьков, ускоряющее высвобождение фенолов	60–75	10–20 мин	40–55	Вода, этанол	Хорошая	[34]
Высокое давление (HPP)	Обработка 300–600 МПа; разрушение клеток без нагрева	45–60	5–10 мин	Без нагревания	Вода	Высокая	[35–37]
Импульсное электрическое поле (PEF)	Электропорация клеток, повышение проницаемости для растворителя	60–80	5–20 мин	20–40	Вода, этанол	Высокая	[38]
Мембранные технологии (UF/NF/RO)	Микро-, ультра- и нанофльтрация для концентрирования и очистки экстрактов	70–80	10–30 мин	20–40	Вода, этанол	Высокая	[39–40]

Перспективным методом для извлечения полифенолов из виноградных выжимок является микроволновая экстракция (MAE). Технология сочетает высокую эффективность процесса с возможностью работы при пониженных температурах, что обеспечивает сохранение биологической активности целевых соединений [33].

Сравнительный анализ различных физических методов экстракции выявил, что сверхкритическая экстракция CO₂ и сублимационная сушка демонстрируют максимальную эффективность извлечения полифенольных соединений (до 95 %). Методы позволяют получать экстракты с сохранением антиоксидантных свойств и высоким содержанием биологически активных компонентов, таких как катехины и флавоноиды [22, 23, 41].

Альтернативные технологии, включая гидродинамическую кавитацию и обработку импульсным электрическим полем, показывают несколько меньшую эффективность (около 75 %), но остаются перспективными для применения в производстве функциональных продуктов питания и косметических средств. В то же время традиционный метод экстракции кипячением демонстрирует наименьшую эффективность (50 %), что делает его экономически нецелесообразным по сравнению с современными технологиями [38].

Научный и практический интерес представляет комбинирование различных физических методов экстракции, что может привести к синергетическому эффекту и дальнейшему повышению эффективности процесса извлечения полифенольных соединений из растительного сырья [41–43].

Химические методы. Сравнительный анализ химических методов экстракции полифенолов из растительного сырья приведен в таблице 2.

Процесс экстракции полифенолов включает их систематическое высвобождение из растительной матрицы, причем растворимые формы извлекаются с помощью водно-органических растворителей, тогда как нерастворимые комплексы, связанные с клеточными стенками посредством эфирных, сложноэфирных и гликозидных связей, требуют дополнительной обработки кислотным или щелочным гидролизом [44].

Стандартный процесс выделения полифенолов включает последовательные стадии: экстракцию, обработку спиртовыми растворами, концентрирование, осаждение и очистку целевых соединений. Критическим параметром экстракционного процесса является подбор опти-

мального растворителя. Водные растворы эффективны для экстракции гидроксикоричных кислот, флавоноидов и их производных, однако демонстрируют низкую эффективность при выделении гликозидов кверцетина [45–47]. Наибольший потенциал для оптимизации процесса сосредоточен на начальной стадии экстракции, где ключевыми параметрами являются состав экстрагента, температурный режим, соотношение сырье-растворитель и условия последующей обработки [6, 48].

Экспериментальные исследования экстракции фенольных соединений из скорлупы орехов продемонстрировали значительное влияние размера частиц (оптимум 1 мм) и температуры (75 °C) на процесс извлечения. Оптимальные концентрации этанола составили 53 %, 54 и 65 % для скорлупы арахиса, кокоса и макадамии соответственно. При этом размер частиц оказывал наиболее существенное влияние на кинетику экстракции [48].

Традиционная водно-спиртовая экстракция на примере листьев оливы (*O. europaea*) предусматривает трехкратное кипячение образца в 70 % этаноле по 90 мин, что в сумме занимает 270 мин. После каждого цикла экстракции жидкая фаза отделяется фильтрованием, а объединенный фильтрат подвергается сушке и анализу [10].

Предварительная механическая обработка сырья, направленная на уменьшение размера частиц, значительно ускоряет процесс экстракции. Исследования экстракции виноградных выжимок показали эффективность водно-спиртовых смесей (70 : 30) в сочетании с ультразвуковой обработкой. Последующий хроматографический анализ выявил 45 различных соединений, включая фенольные компоненты, тритерпены и органические кислоты. Использование этанольных растворов с концентрацией 50–60 % обеспечивает эффективную экстракцию как полярных, так и неполярных соединений и перспективно для масштабирования процесса [2, 49–51].

Современные исследования в области экстракции биологически активных соединений выделяют глубокие эвтектические растворители (DES) как новый класс экологически безопасных экстрагентов. Соединения, впервые описанные A. Abbott в начале 2000-х гг., образуются при смешении кислот и оснований Бренстеда или Льюиса, формируя систему с пониженной температурой плавления за счет образования прочных водородных связей [52–55].

DES имеет свойства, аналогичные ионным жидкостям, но при этом отличаются значительно меньшей токсичностью и высокой биоразлагаемостью. К их технологическим преимуществам относятся: минимальная летучесть; негорючесть; экономическая доступность. Типичный состав DES включает хлорид холина в качестве акцептора водородных связей и многоатомные соединения (карбоновые кислоты, спирты или сахара) как доноры. Например, система хлорид холина-глицерин (1 : 2 мольн.) с температурой плавления $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ показала высокую эффективность при извлечении флавоноидов и других полифенольных соединений из растительного сырья [52–54, 56, 57].

Развитие экологически безопасных технологий экстракции направлено на минимизацию использования органических растворителей на всех этапах – от подготовки проб до очистки конечного продукта. Такой подход не только снижает экологическую нагрузку, но и уменьшает образование нежелательных побочных продуктов.

Основное преимущество химических методов экстракции заключается в возможности точной регулировки параметров процесса – температуры, продолжительности экстракции и концентрации растворителя, что позволяет оптимизировать выход целевых соединений при минимальном протекании побочных реакций. Большинство химических методов адаптированы для промышленного масштабирования [6, 42–44].

При выборе конкретного метода экстракции необходимо учитывать как его технологические преимущества, так и потенциальные экологические и экономические риски.

Для извлечения полифенолов из виноградных выжимок широко применяются методы мацерации и перколяции с использованием этанола или метанола. Технологии основаны на продолжительном контакте растительного материала с растворителем при контролируемых температурных условиях, что обеспечивает эффективное извлечение целевых соединений [2, 49].

Выявлено, что химические методы экстракции имеют ряд ограничений. Некоторые методики могут вызывать структурные изменения полифенольных соединений, такие как окисление или изомеризация, что негативно влияет на их биологическую активность. Дополнительные стадии очистки для удаления остаточных растворителей увеличивают себестоимость процесса, а высокая цена некоторых реагентов делает производство экономически невыгодным [41, 42, 44, 54]. Вместе с этим применение орга-

нических растворителей создает потенциальную экологическую угрозу и требует разработки специальных систем утилизации отходов.

Комбинирование методов экстракции. Для преодоления недостатков физических и химических методов экстракции разрабатываются комбинированные подходы к интенсификации процесса.

Сравнительный анализ комбинированных методов экстракции полифенолов из растительного сырья приведен в таблице 3.

Исследование экстракции антиоксидантов из пяти видов растительных жмыхов показало преимущество ультразвукового метода перед традиционной водяной баней, особенно при комнатной температуре. Сравнение различных экстрагентов выявило наибольшую антиоксидантную активность у ацетоновых экстрактов (АЕА) по сравнению с этанольными (ЕЕА) и метанольными (МЕА). Добавление пектиназы значительно повышало антиоксидантные свойства экстрактов. FAMD-анализ подтвердил, что хотя взаимодействия между основными факторами статистически значимы, их вклад в общую дисперсию данных остается незначительным [52–54, 58].

В ходе сравнительного исследования экстракции традиционной, микроволновой и ультразвуковой с использованием различных растворителей было установлено, что:

- максимальный выход экстракта (34,53 %) достигнут при микроволновой экстракции с этанолом;
- ультразвуковая экстракция обеспечила наибольшее содержание фенольных соединений (290,47 мг г/г) и флавоноидов (36,95 мг г/г);
- наивысшую антиоксидантную активность по тестам DPPH (79,84 %) и ABTS (81,24 %) показали этанольные экстракты, полученные ультразвуковым методом.

Традиционная экстракция продемонстрировала значительно более низкие показатели по всем исследуемым параметрам.

Технологический процесс характеризуется оптимальными временными (2–4 часа) и температурными ($40\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$) параметрами, что способствует сохранению структуры и активности термолабильных соединений. Контролируемые условия экстракции обеспечивают высокую стабильность полифенолов к окислительным процессам, содержание целевых соединений в конечном продукте достигает 30–45 % от массы сухого сырья [6].

Таблица 2

Сравнительный анализ химических методов экстракции полифенолов из растительного сырья
Comparative analysis of chemical methods of extraction of polyphenols from plant raw materials

Метод экстракции полифенола	Рекомендуемые растворители	Эффективность экстракции (диапазон), %	Время экстракции, мин	Температура экстракции, °С	Очистка	Устойчивость полифенолов к окислению	Экологичность метода	Источник
Метанольная экстракция	Метанол–вода (50–80 %)	80–95	30–120	40–60	Требуется	Низкая (окисление ↑)	Низкая	[41, 59]
Этанольная экстракция	Этанол–вода (50–70 %)	70–90	30–120	40–60	Требуется	Средняя	Низкая	[6, 50–51]
Ацетоновая экстракция	Ацетон–вода 50–80 %	80–95	15–60	30–50	Требуется	Низкая	Низкая	[25, 41]
Кислотная экстракция	Лимонная, уксусная, яблочная кислоты; кислые водные растворы	60–85	30–120	50–80	Требуется	Средняя	Средняя	[44]
DES-экстракция (глубокие Эвтектические растворители)	DES: хлорид холина + глицерин / органические кислоты	80–95	15–60	40–60	Минимальная	Высокая	Высокая	[52, 54, 56]
Соляная Экстракция (HCl mild)	Разбавленные водные растворы HCl	80–90	30–60	50–70	Требуется	Низкая	Низкая	[44]

Сравнительный анализ комбинированных методов экстракции полифенолов из растительного сырья
Comparative analysis of combined methods of extraction of polyphenols from plant raw materials

Метод экстракции	Компоненты метода	Краткое описание метода	Эффективность экстракции, %	Время экстракции	Температура экстракции, °С	Устойчивость полифенолов	Качество экстракта	Экологичность метода	Источник
Ультразвук + ферментная обработка	УЗ-обработка + пектиназа	Фермент разрушает клеточные стенки, УЗ усиливает диффузию	Значительное повышение относительно контроля	30–60 мин	30–45	Высокая	Антиоксидантная активность повышается, содержание фенолов ↑	Частично	[60–61]
Микроволновая экстракция + растворители (MW–EtOH)	Микроволны + этанол 70–80 %	Быстрое нагревание и ускоренная диффузия этанола	30–35 % выхода; фенолы 250–300 мг GAE/г	5–20 мин	60–80	Высокая	Максимальный выход экстракта среди методов в исследовании	Средняя	[30]
Ультразвук + этанол/ метанол (UAE)	УЗ-обработка + водно-спиртовые смеси	Интенсификация массообмена за счет кавитации	Высокая (флавоноиды 30–40 мг RE/г, фенолы ~290 мг GAE/г)	20–40 мин	30–50	Средняя	Высокое содержание флавоноидов и фенолов	Средняя	[14]
Традиционная экстракция + УЗ/МВ оптимизация	Нагрев + УЗ или МВ	Совмещение термической и физической интенсификации	20–40 %	2–4 ч	40–60	Средняя	Стабильность полифенолов 30–45 % от сухого сырья	Средняя	[8]
Ферментная обработка + экстракция этанолом	Пектиназа + этанол 50–60 %	Предгидролиз клеточных стенок + растворение фенолов	Увеличение эффективности по сравнению с контролем	1–2 ч	40–55	Средняя	Повышение выхода по полифенолам	Средняя	[62]
Комбинированные «зеленые» технологии	УЗ/МВ + экологичные растворители (этанол, вода)	Интенсификация без токсичных растворителей	Различается по сырью	1–3 ч	40–60	Высокая	Стабильность антиоксидантов высокая	Высокая	[42–43]

Экономическая целесообразность комбинированных методов подтверждается относительно низкой себестоимостью производства (1 200–1 500 рублей за килограмм готового экстракта). Следует учитывать технологические сложности процесса, требующего строгого контроля параметров на всех этапах. Дополнительным ограничением служит высокая чувствительность метода к качеству исходного сырья и необходимость его предварительной подготовки [42].

Комбинированные методы экстракции представляют значительный интерес для фармацевтической, пищевой и косметической промышленности. Их дальнейшее совершенствование направлено на оптимизацию технологических параметров и расширение сырьевой базы [43].

Заключение. Проанализированы различные методы экстракции полифенольных соединений из растительного сырья: физические (включая ультразвуковую, микроволновую, сверхкритическую жидкостную экстракцию), химические (с использованием органических растворителей), комбинированные.

Выявлены основные преимущества и ограничения различных технологий экстракции.

Установлено, что распространенные в настоящее время традиционные методы экстракции характеризуются высоким расходом органических растворителей, длительностью процесса, невозможностью точного контроля параметров и др. Современные «зеленые» технологии экстракции обеспечивают более высокую эффективность и экологичность по сравнению с традиционными методами. Определена эффективность различных методов экстракции, %: сверхкритическая жидкостная экстракция – 64;

ультразвуковая экстракция – 58; микроволновая экстракция – 37; мембранная технология – 75; традиционная экстракция кипячением – 50.

Установлено, что наибольший практический интерес представляют комбинированные методы экстракции, сочетающие высокую эффективность, экологичность и экономическую целесообразность. Комбинированные подходы позволяют достичь синергетического эффекта. Так, наиболее результативной с точки зрения извлечения и сохранности полифенольных веществ является сверхкритическая жидкостная экстракция (до 95 % извлечения) с последующей сублимационной сушкой. Перспективными направлениями являются разработка экологически безопасных методов экстракции и оптимизация существующих технологий.

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

Благодарности: авторы выражают благодарность Наталье Михайловне Агеевой – главному научному сотруднику НЦ «Виноделие» ФГБНУ СКФНЦСВВ, доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки Российской Федерации и Кубани, за ее ценные советы и высокий профессионализм.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в связи с публикацией данной статьи.

Список источников

1. Позняковский В.М. Вызовы и стратегические мегатренды современной нутрициологии // Индустрия питания. 2024. Т. 9, № 2. С. 5–12. DOI: 10.29141/2500-1922-2024-9-2-1. EDN: CBXCZW.
2. Агеева Н.М., Тихонова А.Н., Воробьева Т.Н., и др. Актуальные вопросы переработки вторичного сырья винодельческой промышленности. Краснодар: Экоинвест, 2022. 204 с. EDN: KNMUYT.
3. 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: an overview // Food and Bioprocess Technology. 2021. Vol. 14. P. 1407–1431. DOI: 10.1007/s11947-021-02665-4. EDN: TSXEYK.
4. El Oirdi M. Harnessing the power of polyphenols: a new frontier in disease prevention and therapy // Pharmaceuticals. 2024. Vol. 17, N 6. Art. 692. DOI: 10.3390/ph17060692. EDN: HZCZHY.
5. Бобрышева Т.Н., Анисимов Г.С., Золоторева М.С., и др. Полифенолы как перспективные биологически активные соединения // Вопросы питания. 2023. Т. 92, № 1. С. 92–107. DOI: 10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107. EDN: HACWFZ.

6. Rajha H.N., Boussetta N., Vorobiev E. Conventional solvent extraction of polyphenols: process intensification and optimization // Food Chemistry. 2021. Vol. 347. Art. 129094. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129094.
7. Diwathe P.A., Sarkar T., Pati S., et al. Valorization of vegetable waste to valuable bioactive compounds using various extraction methods. In: Bioactive Extraction and Application in Food and Nutraceutical Industries. Humana; 2024. DOI: 10.1007/978-1-0716-3601-5_8.
8. Султанова Ш.А., Усенов А.Б., Самандаров Д.И., и др. Применение ультразвукового экстрактора для отделения фенола-антиоксиданта из *Mentha aquatica* // Universum: технические науки. 2021. № 3-4. С. 41–43. DOI: 10.32743/UniTech.2021.84.3-4.41-43. EDN: WJWKQF.
9. Chemat F., Rombaut N., Meullemiestre A., et al. Review of green extraction of natural products: principles, recent advances and applications // International Journal of Molecular Sciences. 2017. Vol. 18, N 7. Art. 1529. DOI: 10.3390/ijms18071529.
10. Хизриева С.С., Борисенко С.Н., Максименко Е.В., и др. Субкритическая вода как инструмент получения продуктов с высокой антиоксидантной активностью из листьев оливы (*Olea europaea* L.) // Химия растительного сырья. 2022. № 2. С. 137–146. DOI: 10.14258/jcprm.20220210519. EDN: LRBYOZ.
11. Brezo-Borjan T., Švarc-Gajić J.V. Subcritical water extraction of *Taraxacum officinale* flowers: influence of temperature on polyphenol content and antioxidant activity // Food and Feed Research. 2024. Vol. 51, N 2. P. 219–227. DOI: 10.5937/ffr0-53875. EDN: IZUOUY.
12. Хизриева С.С., Борисенко С.Н., Максименко Е.В., и др. Субкритическая вода для получения экстрактов из листьев *Ginkgo biloba* L. // Химия растительного сырья. 2023. № 2. С. 241–251. DOI: 10.14258/jcprm.20230211437. EDN: UOISJU.
13. Veggi C.P., Santos D.T., Tixier A.S.F., et al. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from Jatoba bark // Food and Public Health. 2013. Vol. 3, N 3. P. 119–129. DOI: 10.5923/j.fph.20130303.02.
14. Абрамов В.О., Баязитов В.М., Камлер А.В., и др. Влияние ультразвука на процесс экстракции полифенолов из виноградных косточек // Пищевая промышленность. 2022. № 11. С. 88–92. DOI: 10.52653/PPI.2022.11.11.020. EDN: RXZXP.
15. Замотаева Т.Л., Шеметова А.Ф., Черкашина А.С., и др. Лиофилизация ферментов для полимеразной цепной реакции // Биотехнология. 2023. Т. 39, № 4. С. 50–54. DOI: 10.56304/S0234275823040105. EDN: EWGURF.
16. Jaiswal S.G., Naik S. Review on Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Medicinal Natural Products. In: Contemporary Perspective on Science, Technology and Research. 2024. Vol. 6. P. 160–184. DOI: 10.9734/bpi/cpstr/v6.
17. Biswas A., Dey S., Xiao A., et al. Ultrasound-assisted extraction of antioxidant phenolics from *Corchorus olitorius* leaves: optimization // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2023. Vol. 10, N 64. DOI: 10.1186/s40538-023-00443-2. EDN: LWJPAZ.
18. Еремеева Н.Б., Макарова Н.В. Влияние технологии экстракции на антиоксидантную активность экстрактов плодов черноплодной рябины // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2017. Т. 20, № 3. С. 600–608. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-3-600-608. EDN: ZMVWDV.
19. Дышлюк Л.С., Каширских Е.В., Носкова С.Ю., и др. Анализ способов очистки экстрактов из дикорастущего сырья // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 4 (43). С. 12–21. EDN: XELEFH.
20. Rios-Corripio G., Welti-Chanes J., Rodríguez-Martínez V., et al. Influence of high hydrostatic pressure processing on physicochemical characteristics of fermented pomegranate beverage // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2019. Art. 102249. DOI: 10.1016/j.ifset.2019.102249. EDN: YUXQCR.
21. Potapovich A.I., Kostyuk T.V., Ishutina O.V., et al. Effects of polyphenols on DNA damage after UV-C exposure // Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology. 2023. Vol. 396. P. 1923–1930. DOI: 10.1007/s00210-023-02443-3. EDN: RFKQWU.

22. Koirala P., Ghimire S., Rai S., et al. Extraction of nutraceuticals with super- and subcritical liquids. In: Bioactive Extraction and Application in Food and Nutraceutical Industries. Humana; 2024. DOI: 10.1007/978-1-0716-3601-5_6.
23. Argun M.E., Argun M.Ş. Supercritical CO₂ extraction of valuable compounds from apricot waste // Food Measurement and Characterization. 2025. Vol. 19. P. 2395–2408. DOI: 10.1007/s11694-025-03118-8. EDN: ZRYCOD.
24. Захарова Л.В. Разработка методики экстракции полифенолов из *Fucus vesiculosus* // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11, № 5-8. С. 73–81. DOI: 10.37614/2307-5252.2020.11.5.008. EDN: OPDZHA.
25. Zhang Q., Chen H., Wang M., et al. Phenolic profiles of berry pomace extracts obtained by various methods // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 67. Art. 105120. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105120. EDN: LOKVZE.
26. Bayram Y. Optimizing polyphenol extraction from *Prunus spinosa* L. fruit // Food Measurement and Characterization. 2024. Vol. 18. P. 6673–6686. DOI: 10.1007/s11694-024-02681-w. EDN: CHDTRD.
27. Zeng X., Dai H., Liu B., et al. Optimization of Tieguanyin tea polyphenols extraction // Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. Vol. 14. P. 29973–29983. DOI: 10.1007/s13399-023-04821-6. EDN: LUFYSI.
28. Tomasi I.T., Vázquez S., Spigno G. Microwave-assisted extraction of polyphenols from chestnut shells // Sustainable Chemistry for Environmental Applications. 2023. Vol. 3. Art. 100082. DOI: 10.1016/j.suschema.2023.100082. EDN: LBARYN.
29. Zhang L., Wang Y., Zhao L. Microwave-ethanol extraction of polyphenols from citrus peels // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 76. Art. 105657. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105657. EDN: LDVVD.
30. Fraterrigo Garofalo S., Demichelis F., et al. Comparative study of polyphenol extraction using physical techniques with water as solvent // Environmental Science and Pollution Research. 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-34637-4. EDN: VBECEB.
31. Srinivasan S., Perumal V. Subcritical water extraction of polyphenols from *Moringa oleifera* leaves // Journal of Food Process Engineering. 2023. Vol. 46, N 2. Art. e14297. DOI: 10.1111/jfpe.14297.
32. Niazmand R., Shahidi N., Niazmand A. Subcritical water extraction of phenolic compounds from *Ziziphus jujuba* fruits: optimization and antioxidant activity // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2021. Vol. 8. Art. 3. DOI: 10.1186/s40538-020-00203-6. EDN: IBGFWZ.
33. Хизриева С.С., Борисенко С.Н., Максименко Е.В., и др. Субкритическая вода как инструмент для получения экстрактов из листьев *Ginkgo biloba* L. // Биоорганическая химия. 2024. Т. 50, № 7. С. 2804–2812. DOI: 10.1134/S1068162024070148. EDN: MQOUOQ.
34. Arya R.S., Aithal M., Menon A. Non-thermal hydrodynamic cavitation // Ultrasonics Sonochemistry. 2023. Vol. 98. Art. 106504. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106504. EDN: YERAVK.
35. Nawawi N.I.M., Ijod G., Senevirathna S.S.J., et al. Comparison of high-pressure and thermal pasteurization of strawberry products // Food Science and Biotechnology. 2023. Vol. 32, N 6. P. 729–747. DOI: 10.1007/s10068-023-01276-3. EDN: UQKXON.
36. Yong S.X.M., Song C.P., Choo W.S. Impact of high-pressure homogenization on phytochemicals // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2021. Vol. 4. Art. 593259. DOI: 10.3389/fsufs.2020.593259. EDN: ILPSZX.
37. Сидорова Ю.С., Петров Н.А., Зорин С.Н., и др. Инновационные методы экстракции биологически активных веществ из растительного сырья // Вопросы питания. 2023. Т. 92, № 6. С. 28–37. DOI: 10.33029/0042-8833-2023-92-6-28-37. EDN: TFLCXR.
38. Hegde S., Sivamani Y., Muthuraman A., et al. Pulsed electric field extraction. In: Bioactive Extraction and Application in Food and Nutraceutical Industries. Humana; 2024. P. 223–253. DOI: 10.1007/978-1-0716-3601-5_10.
39. Arboleda Mejia J.A., Ricci A., Figueiredo A.S., et al. Membrane-based operations for fractionation of polyphenols // Food and Bioprocess Technology. 2022. Vol. 15. P. 933–948. DOI: 10.1007/s11947-022-02795-3. EDN: QBJWSS.

40. Hellwig V., Gasser J. Polyphenols from waste streams of food industry // *Phytochemistry Reviews*. 2020. Vol. 19. P. 1539–1546. DOI: 10.1007/s11101-020-09663-y. EDN: HKSPXI.
41. de Andrade Lima M., Andreou R., Charalampopoulos D., et al. Supercritical CO₂ extraction of phenolic compounds from potato peels // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, N 8. Art. 3410. DOI: 10.3390/app11083410.
42. Sen S., Chakraborty R. Зеленые методы экстракции полифенолов // *Food Chemistry*. 2022. Vol. 367. Art. 130743. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130743. EDN: RRHNF1.
43. Anwar M.M.J. Advances in green technologies for bioactive extraction // *Haya: The Saudi Journal of Life Sciences*. 2025. Vol. 10, N 5. P. 184–195. DOI: 10.36348/sjls.2025.v10i05.005.
44. Palos-Hernández A., González-Paramás A.M., Santos-Buelga C. Latest advances in green extraction of polyphenols // *Molecules*. 2025. Vol. 30, N 1. Art. 55. DOI: 10.3390/molecules30010055. EDN: WPNYDG.
45. David A.J., Abinandan S., Vaidyanathan V.K., et al. Pretreatment methods for bioethanol production // *3 Biotech*. 2023. Vol. 13. Art. 233. DOI: 10.1007/s13205-023-03657-1. EDN: KLOKLG.
46. Еремеева Н.Б., Макарова Н.В. Изучение содержания антиоксидантов и их активности в концентрированных экстрактах из ягод клюквы (*Vaccinium oxycoccus*), 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/jcprm.2021049365. EDN: ZHPGJC.
47. Макарова Н.В., Еремеева Н.Б., Игнатова Д.Ф. Влияние технологии экстракции на антиоксидантную активность ягод // *Труды МГТУ*. 2019. Т. 22, № 3. С. 322–330. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-3-322-330. EDN: AAUNGM.
48. Раимова К.В., Абдулладжанова Н.Г., Матчанов А.Д., и др. Химическая структура полифенольного состава листьев *Crataegus pontica* // *Химия растительного сырья*. 2023. № 4. С. 147–154. DOI: 10.14258/jcprm.20230412529. EDN: SBMLGS.
49. Dulo B., De Somer T., Moyo M., et al. Kinetic modeling of phenolic compounds extraction from nutshells // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 14. P. 23565–23579. DOI: 10.1007/s13399-023-04993-1. EDN: WIWXY5.
50. Khalfi A., Garrigós M.C., Ramos M., et al. Optimization of the microwave-assisted extraction conditions for phenolic compounds from date seeds // *Foods*. 2024. Vol. 13, N 23. Art. 3771. DOI: 10.3390/foods13233771. EDN: GPOGNS.
51. Singh A., Sabally K., Sahay S. Mechanical disruption combined with solvent extraction: a review // *Food Research International*. 2023. Vol. 172. Art. 113226. DOI: 10.1016/j.foodres.2023.113226. EDN: ZYWHWL.
52. Sridhara A., Anand S. Techniques and modeling of polyphenol extraction from food by-products // *Food Research International*. 2021. Vol. 140. Art. 110497. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110497.
53. Tripathi A.K., Sutar K.J. Advances in the extraction of polyphenols using natural deep eutectic solvents // *Chemical Papers*. 2025. DOI: 10.1007/s11696-025-04039-y. EDN: PLLDXX.
54. Sahu S., Kumari D., Kusam K., et al. Deep eutectic solvent extraction of polyphenols from plant materials: current status and future prospects in food applications // *Food Chemistry*. 2025. Art. 144125. DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.144125.
55. Petit E., Rouger C., Griffault E., et al. Optimization of polyphenols extraction from grapevine canes using NADES // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 14. P. 30545–30557. DOI: 10.1007/s13399-023-04919-x. EDN: FMEZJY.
56. Wu T., Li X., Li J., et al. Deep eutectic solvents for polyphenol extraction // *Trends in Food Science & Technology*. 2024. Vol. 145. Art. 104063. DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104063.
57. Цветов Н.С., Коровкина А.В., Паукшта О.И. Экстракция флавоноидов из *Koenigia weyrichii* с помощью глубокой эвтектической смеси // *Химия растительного сырья*. 2021. № 4. С. 199–206. DOI: 10.14258/jcprm.2021049530. EDN: ECBKEV.
58. Klongdee S., Klinkesorn U. Extraction of polyphenols from rambutan peel using accelerated aqueous ethanol // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Art. 21153. DOI: 10.1038/s41598-022-25818-7. EDN: OAWSJN.

59. Rajabi M., Amiri S., Rezazadeh-Bari M. Optimization of hesperidin extraction using hot methanol assisted by ultrasound // *Food Measurement and Characterization*. 2023. Vol. 17. P. 5582–5593. DOI: 10.1007/s11694-023-02070-9. EDN: BRMOWK.
60. Chen Y., Chen J., Liu Y., et al. Ultrasonic cellulase-assisted extraction and antioxidant activity of polyphenols from passion fruit // *Molecules*. 2021. Vol. 26, N 9. Art. 2494. DOI: 10.3390/molecules26092494. EDN: UBWNGV.
61. Zhang L., Liu X., Wang Y., et al. Enzymatic pretreatment to improve extraction efficiency of polyphenols from apple pomace // *Food Chemistry*. 2023. Vol. 418. Art. 135993. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.135993.
62. Brienza F., Calani L., Bresciani L., et al. Optimized enzymatic extraction of phenolic compounds from *Verbascum nigrum* L. // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, N 3. Art. 1405. DOI: 10.3390/app15031405. EDN: MHSMTN.

References

1. Poznyakovskiy VM. Vyzovy i strategicheskie megatrendy sovremennoj nutriciologii. *Industriya pitaniya*. 2024;9(2):5-12. (In Russ.). DOI: 10.29141/2500-1922-2024-9-2-1. EDN: CBXCZW.
2. Ageeva NM, Tikhonova AN, Vorob'eva TN, et al. Aktual'nye voprosy pererabotki vtorichnogo syr'ya vinodel'cheskoj promyshlennosti. Krasnodar: Ekoinvest; 2022. 204 p. (In Russ.). EDN: KNMUYT.
3. Moro KIB, Bender ABB, da Silva LP, et al. Green extraction methods and microencapsulation technologies of phenolic compounds from grape pomace: an overview. *Food and Bioprocess Technology*. 2021;14:1407-1431. DOI: 10.1007/s11947-021-02665-4. EDN: TSXEYK.
4. El Oirdi M. Harnessing the power of polyphenols: a new frontier in disease prevention and therapy. *Pharmaceuticals*. 2024;17(6):692. DOI: 10.3390/ph17060692. EDN: HZCZHY.
5. Bobrysheva TN, Anisimov GS, Zolotoreva MS, et al. Polifenoly kak perspektivnye biologicheski aktivnye soedineniya. *Voprosy pitaniya*. 2023;92(1):92-107. (In Russ.). DOI: 10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107. EDN: HACWFZ.
6. Rajha HN, Boussetta N, Vorobiev E. Conventional solvent extraction of polyphenols: process intensification and optimization. *Food Chemistry*. 2021;347:129094. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129094.
7. Diwathe PA, Sarkar T, Pati S, et al. Valorization of vegetable waste to valuable bioactive compounds using various extraction methods. In: *Bioactive Extraction and Application in Food and Nutraceutical Industries*. Humana; 2024. DOI: 10.1007/978-1-0716-3601-5_8.
8. Sultanova ShA, Usenov AB, Samandarov DI, et al. Primenenie ul'trazvukovogo ekstraktora dlya otdeleniya fenola-antioksidanta iz *Mentha aquatica*. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2021;(3-4):41-43. (In Russ.). DOI: 10.32743/UniTech.2021.84.3-4.41-43. EDN: WJWKQF.
9. Chemat F, Rombaut N, Meullemiestre A, et al. Review of green extraction of natural products: principles, recent advances and applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 2017;18(7):1529. DOI: 10.3390/ijms18071529.
10. Khizrieva SS, Borisenko SN, Maksimenko EV, et al. Subkriticheskaya voda kak instrument polucheniya produktov s vysokoj antioksidantnoj aktivnost'yu iz list'ev olivy (*Olea europaea* L.). *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2022;(2):137-146. (In Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20220210519. EDN: LRBYOZ.
11. Brezo-Borjan T, Švarc-Gajić JV. Subcritical water extraction of *Taraxacum officinale* flowers: influence of temperature on polyphenol content and antioxidant activity. *Food and Feed Research*. 2024;51(2):219-227. DOI: 10.5937/ffr0-53875. EDN: IZUOUY.
12. Khizrieva SS, Borisenko SN, Maksimenko EV, et al. Subkriticheskaya voda dlya polucheniya ekstraktov iz list'ev *Ginkgo biloba* L. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2023;(2):241-251. (In Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20230211437. EDN: UOISJU.
13. Veggi CP, Santos DT, Tixier ASF, et al. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from Jatoba bark. *Food and Public Health*. 2013;3(3):119-129. DOI: 10.5923/j.fph.20130303.02.

14. Abramov VO, Bayazitov VM, Kamler AV, et al. Vliyanie ul'trazvuka na protsess ekstraktsii polifenolov iz vinogradnykh kostochech. *Pishchevaya promyshlennost'*. 2022;(11):88-92. (In Russ.). DOI: 10.52653/PPI.2022.11.11.020. EDN: RXZXP.
15. Zamotaeva TL, Shemetova AF, Cherkashina AS, et al. Liofilizatsiya fermentov dlya polimeraznoj tsepnoj reaktsii. *Biotehnologiya*. 2023;39(4):50-54. (In Russ.). DOI: 10.56304/S0234275823040105. EDN: EWGURF.
16. Jaiswal SG, Naik S. Review on supercritical carbon dioxide extraction of medicinal natural products. *Contemporary Perspective on Science, Technology and Research*. 2024;6:160-184. DOI: 10.9734/bpi/cpstr/v6.
17. Biswas A, Dey S, Xiao A, et al. Ultrasound-assisted extraction of antioxidant phenolics from *Corchorus olitorius* leaves: optimization. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2023;10(64). DOI: 10.1186/s40538-023-00443-2. EDN: LWJPAZ.
18. Eremeeva NB, Makarova NV. Vliyanie tekhnologii ekstraktsii na antioksidantnuyu aktivnost' ekstraktov plodov chernoplodnoy ryabiny. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017;20(3):600-608. (In Russ.). DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-3-600-608. EDN: ZMVWDV.
19. Dyshlyuk LS, Kashirskikh EV, Noskova SYu, et al. Analiz sposobov ochistki ekstraktov iz dikorastushchego syr'ya. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2016;4(43):12-21. (In Russ.). EDN: XELEFH.
20. Rios-Corripio G, Welti-Chanes J, Rodríguez-Martínez V, et al. Influence of high hydrostatic pressure processing on physicochemical characteristics of fermented pomegranate beverage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2019;57:102249. DOI: 10.1016/j.ifset.2019.102249. EDN: YUXQCR.
21. Potapovich AI, Kostyuk TV, Ishutina OV, et al. Effects of polyphenols on DNA damage after UV-C exposure. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*. 2023;396:1923-1930. DOI: 10.1007/s00210-023-02443-3. EDN: RFKQWU.
22. Koirala P, Ghimire S, Rai S, et al. Extraction of nutraceuticals with super- and subcritical liquids. In: *Bioactive Extraction and Application in Food and Nutraceutical Industries*. Humana; 2024. DOI: 10.1007/978-1-0716-3601-5_6.
23. Argun ME, Argun MŞ. Supercritical CO₂ extraction of valuable compounds from apricot waste. *Food Measurement and Characterization*. 2025;19:2395-2408. DOI: 10.1007/s11694-025-03118-8. EDN: ZRYCOD.
24. Zakharova LV. Razrabotka metodiki ekstraktsii polifenolov iz *Fucus vesiculosus*. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN*. 2020;11(5-8):73-81. (In Russ.). DOI: 10.37614/2307-5252.2020.11.5.008. EDN: OPDZHA.
25. Zhang Q, Chen H, Wang M, et al. Phenolic profiles of berry pomace extracts obtained by various methods. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020;67:105120. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105120. EDN: LOKVZE.
26. Bayram Y. Optimizing polyphenol extraction from *Prunus spinosa* L. fruit. *Food Measurement and Characterization*. 2024;18:6673-6686. DOI: 10.1007/s11694-024-02681-w. EDN: CHDTRD.
27. Zeng X, Dai H, Liu B, et al. Optimization of Tieguanyin tea polyphenols extraction. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024;14:29973-29983. DOI: 10.1007/s13399-023-04821-6. EDN: LUFYSI.
28. Tomasi IT, Vázquez S, Spigno G. Microwave-assisted extraction of polyphenols from chestnut shells. *Sustainable Chemistry for Environmental Applications*. 2023;3:100082. DOI: 10.1016/j.suschema.2023.100082. EDN: LBARYN.
29. Zhang L, Wang Y, Zhao L. Microwave-ethanol extraction of polyphenols from citrus peels. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;76:105657. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105657. EDN: LDVVYD.
30. Fraterrigo Garofalo S, Demichelis F, et al. Comparative study of polyphenol extraction using physical techniques with water as solvent. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-34637-4. EDN: VBCECB.
31. Srinivasan S, Perumal V. Subcritical water extraction of polyphenols from *Moringa oleifera* leaves. *Journal of Food Process Engineering*. 2023;46(2):e14297. DOI: 10.1111/jfpe.14297.

32. Niazmand R, Shahidi N, Niazmand A. Subcritical water extraction of phenolic compounds from *Ziziphus jujuba* fruits: optimization and antioxidant activity. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2021;8:3. DOI: 10.1186/s40538-020-00203-6. EDN: IBGFWZ.
33. Khizrieva SS, Borisenko SN, Maksimenko EV, et al. Subkriticheskaya voda kak instrument dlya polucheniya ekstraktov iz list'ev *Ginkgo biloba* L. *Bioorganicheskaya khimiya*. 2024;50(7):2804-2812. (In Russ.). DOI: 10.1134/S1068162024070148. EDN: MQOUOQ.
34. Arya RS, Aithal M, Menon A. Non-thermal hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023;98:106504. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106504. EDN: YERAVK.
35. Nawawi NIM, Ijod G, Senevirathna SSJ, et al. Comparison of high-pressure and thermal pasteurization of strawberry products. *Food Science and Biotechnology*. 2023;32(6):729-747. DOI: 10.1007/s10068-023-01276-3. EDN: UQKXON.
36. Yong SXM, Song CP, Choo WS. Impact of high-pressure homogenization on phytochemicals. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021;4:593259. DOI: 10.3389/fsufs.2020.593259. EDN: ILPSZX.
37. Sidorova YuS, Petrov NA, Zorin SN, et al. Innovatsionnye metody ekstratsii biologicheskii aktivnykh veshchestv iz rastitel'nogo syr'ya. *Voprosy pitaniya*. 2023;92(6):28-37. (In Russ.). DOI: 10.33029/0042-8833-2023-92-6-28-37. EDN: TFLCXR.
38. Hegde S, Sivamani Y, Muthuraman A, et al. Pulsed electric field extraction. In: *Bioactive Extraction and Application in Food and Nutraceutical Industries*. Humana; 2024. p. 223-253. DOI: 10.1007/978-1-0716-3601-5_10.
39. Arboleda Mejia JA, Ricci A, Figueiredo AS, et al. Membrane-based operations for fractionation of polyphenols. *Food and Bioprocess Technology*. 2022;15:933-948. DOI: 10.1007/s11947-022-02795-3. EDN: QBJWSS.
40. Hellwig V, Gasser J. Polyphenols from waste streams of food industry. *Phytochemistry Reviews*. 2020;19:1539-1546. DOI: 10.1007/s11101-020-09663-y. EDN: HKSPXI.
41. de Andrade Lima M, Andreou R, Charalampopoulos D, Chatzifragkou A. Supercritical CO₂ extraction of phenolic compounds from potato peels. *Applied Sciences*. 2021;11(8):3410. DOI: 10.3390/app11083410.
42. Sen S, Chakraborty R. Zelenye metody ekstratsii polifenolov. *Food Chemistry*. 2022;367:130743. (In Russ.). DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130743. EDN: RRHNF1.
43. Anwar MMJ. Advances in green technologies for bioactive extraction. Haya: *The Saudi Journal of Life Sciences*. 2025;10(5):184-195. DOI: 10.36348/sjls.2025.v10i05.005.
44. Palos-Hernández A, González-Paramás AM, Santos-Buelga C. Latest advances in green extraction of polyphenols. *Molecules*. 2025;30(1):55. DOI: 10.3390/molecules30010055. EDN: WPNYDG.
45. David AJ, Abinandan S, Vaidyanathan VK, et al. Pretreatment methods for bioethanol production. *3 Biotech*. 2023;13:233. DOI: 10.1007/s13205-023-03657-1. EDN: KLOKLG.
46. Eremeeva NB, Makarova NV. Izuchenie sodержaniya antioksidantov i ikh aktivnosti v kontsentrirrovannykh ekstraktakh iz yagod klyukvy (*Vaccinium oxycoccus*), oblepikhi (*Hippophae rhamnoides* L.), ezheviki (*Rubus fruticosus*), kaliny (*Viburnum opulus* L.) i ryabiny (*Sorbus aucuparia* L.). *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2021;(4):157-164. (In Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021049365. EDN: ZHPGJC.
47. Makarova NV, Eremeeva NB, Ignatova DF. Vliyanie tekhnologii ekstratsii na antioksidantnuyu aktivnost' yagod. *Trudy MGTU*. 2019;22(3):322-330. (In Russ.). DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-3-322-330. EDN: AAUNGM.
48. Raimova KV, Abdulladzhanova NG, Matchanov AD, et al. Khimicheskaya struktura polifenol'nogo sostava list'ev *Crataegus pontica*. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2023;(4):147-154. (In Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20230412529. EDN: SBMLGS.
49. Dulo B, De Somer T, Moyo M, et al. Kinetic modeling of phenolic compounds extraction from nutshells. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024;14:23565-23579. DOI: 10.1007/s13399-023-04993-1. EDN: WIWXYs.
50. Khalfi A, Garrigós MC, Ramos M, Jiménez A. Optimization of the microwave-assisted extraction conditions for phenolic compounds from date seeds. *Foods*. 2024;13(23):3771. DOI: 10.3390/foods13233771. EDN: GPOGNS.

51. Singh A, Sabally K, Sahay S. Mechanical disruption combined with solvent extraction: a review. *Food Research International*. 2023;172:113226. DOI: 10.1016/j.foodres.2023.113226. EDN: ZYWHWL.
52. Sridhara A, Anand S. Techniques and modeling of polyphenol extraction from food by-products. *Food Research International*. 2021;140:110497. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110497.
53. Tripathi AK, Sutar KJ. Advances in the extraction of polyphenols using natural deep eutectic solvents. *Chemical Papers*. 2025. DOI: 10.1007/s11696-025-04039-y. EDN: PLLDXX.
54. Sahu S, Kumari D, Kusam K, et al. Deep eutectic solvent extraction of polyphenols from plant materials: current status and future prospects in food applications. *Food Chemistry*. 2025;482:144125. DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.144125.
55. Petit E, Rouger C, Griffault E, et al. Optimization of polyphenols extraction from grapevine canes using NADES. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024;14:30545-30557. DOI: 10.1007/s13399-023-04919-x. EDN: FMEZJY.
56. Wu T, Li X, Li J, et al. Deep eutectic solvents for polyphenol extraction. *Trends in Food Science & Technology*. 2024;145:104063. DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104063.
57. Tsvetov NS, Korovkina AV, Paukshta OI. Ekstraktsiya flavonoidov iz Koenigia weyrichii s pomoshch'yu glubokoj evtekticheskoy smesi. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2021;(4):199-206. (In Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021049530. EDN: ECBKEV.
58. Klongdee S, Klinkesorn U. Extraction of polyphenols from rambutan peel using accelerated aqueous ethanol. *Scientific Reports*. 2022;12:21153. DOI: 10.1038/s41598-022-25818-7. EDN: OAWSJN.
59. Rajabi M, Amiri S, Rezazadeh-Bari M. Optimization of hesperidin extraction using hot methanol assisted by ultrasound. *Food Measurement and Characterization*. 2023;17:5582-5593. DOI: 10.1007/s11694-023-02070-9. EDN: BRMOWK.
60. Chen Y, Chen J, Liu Y, et al. Ultrasonic cellulase-assisted extraction and antioxidant activity of polyphenols from passion fruit. *Molecules*. 2021;26(9):2494. DOI: 10.3390/molecules26092494. EDN: UBWNGV.
61. Zhang L, Liu X, Wang Y, et al. Enzymatic pretreatment to improve extraction efficiency of polyphenols from apple pomace. *Food Chemistry*. 2023;418:135993. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.135993.
62. Brienza F, Calani L, Bresciani L, et al. Optimized enzymatic extraction of phenolic compounds from *Verbascum nigrum* L. *Applied Sciences*. 2025;15(3):1405. DOI: 10.3390/app15031405. EDN: MHSMTN.

Статья принята к публикации 29.09.2025 / The article accepted for publication 29.09.2025.

Информация об авторах:

Наталья Алексеевна Бугаец, доцент кафедры общественного питания и сервиса, кандидат технических наук, доцент

Наталья Тимофеевна Шамкова, профессор кафедры общественного питания и сервиса, доктор технических наук

Иван Николаевич Кобзарь, аспирант факультета общественного питания и сервиса

Кирилл Яковлевич Кечин, студент 4-го курса факультета общественного питания и сервиса

Information about the authors:

Natalia Alekseevna Bugaets, Associate Professor at the Department of Public Catering and Service, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Natalia Timofeevna Shamkova, Professor at the Department of Public Catering and Service, Doctor of Technical Sciences

Ivan Nikolaevich Kobzar, Postgraduate student at the Faculty of Public Catering and Service

Kirill Yakovlevich Kechin, 4-th year student at the Faculty of Public Catering and Service

