

Научная статья

УДК 66.061.34

DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-2-24-36

Многофакторный анализ технологических, экономических и экологических аспектов при сравнении методов экстракции фенольных соединений из листьев *Brassica oleracea* var. *botrytis*

А.В. Миниахметова*, О.И. Сергиенко

Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург

*avminiakhmetova@itmo.ru

Аннотация. Фенольные соединения, извлекаемые из крупнотоннажных отходов растениеводства – листьев цветной капусты, могут применяться в производстве биологически активных веществ в пищевой и фармацевтической промышленности. Приводятся результаты многофакторного эксперимента для установления рационального метода экстракции фенольных соединений из листьев цветной капусты с учетом технологических и эколого-экономических аспектов. Рассматривается метод мацерации в водном и водно-этиловом растворе и ультразвуковая обработка в водно-этиловом растворе. Анализировали вид экстрагента, продолжительность экстракции, гидромодуль и мощность ультразвука, а также эксплуатационные затраты и показатели экологического воздействия: углеродный след обработки, эвтрофикацию пресных вод и закисление почв. Переработке с целью получения экстракта подвергались высушенные листья цветной капусты сорта Мовир-74, собранные в Ленинградской области. Метод ультразвуковой обработки осуществлялся с применением ультразвуковой ванны, а содержание фенольных соединений устанавливали спектрофотометрическим методом. Показано, что применение ультразвуковой обработки в сравнении с мацерацией снижает продолжительность обработки в 1,5 раза, углеродный след в 1,7 раза и незначительно снижает затраты экстрагента в 1,3 раза. Установление рационального метода и наилучшего режима экстракции в ходе многофакторного эксперимента позволяет повысить эффективность процессов экстракции биологически активных веществ из выбранного сырья, однако для окончательного выбора необходимо учитывать не только эксплуатационные затраты, но и экологическое воздействие.

Ключевые слова: экстрагирование растительного сырья; фенольные соединения; листья цветной капусты; ультразвуковая обработка; многофакторный эксперимент; эксплуатационные затраты; углеродный след

Original article

Multivariate analysis of technological, economic and environmental aspects in comparison of methods for extraction of phenolic compounds from leaves of *Brassica oleracea* var. *botrytis*

Aigul V. Miniakhmetova*, Olga I. Sergienko

ITMO University, St. Petersburg, Russia

*avminiakhmetova@itmo.ru

Annotation. Phenolic compounds extracted from large-tonnage crop waste – cauliflower leaves – can be used in the production of bio-logically active substances in the food and pharmaceutical industries. The results of multifactorial experiment to establish a rational method of ultrasonic treatment mode for extraction of phenolic compounds from cauliflower leaves taking into account ecological and economic aspects are given. The method of maceration in aqueous and aqueous-ethyl solution and ultrasonic treatment in aqueous-ethyl solution were considered. The type of extractant, extraction duration, hydromodule, and ultrasound power were analyzed, as well as operating costs and environmental impact indicators: carbon footprint of the treatment, freshwater eutrophication and soil acidification. Dried cauliflower leaves of the Movir-74 variety from the Leningrad region were processed to obtain the extract. The method of ultrasonic processing was carried out using ultra-sonic bath GRAD 40-35. The content of phenolic compounds was determined by spectrophotometric method on spectro-photometer PE-5400UV. The application of ultrasonic treatment in comparison with maceration reduces the duration of treatment by 2.3 times, carbon footprint by 2.1 times and slightly reduces the cost of extractant by 1.1 times. Finding the rational method and the best mode of extraction during multifactorial experiment allows increasing the efficiency of ex-traction processes of biologically active substances from selected raw materials, however, for the final choice it is necessary to take into account not only the operating costs but also the environmental impact.

Keywords: extraction of plant raw materials; phenolic compounds; cauliflower leaves; ultrasonic treatment; multivariate experiment; operational costs, carbon footprint

Введение

Представители семейства крестоцветных (*Brassicaceae*), насчитывающие свыше 4 тысяч видов, являются полезными продуктами питания, богатыми фенольными соединениями (ФС), включая флавоноиды и глюкозинолаты. Исследования [1, 2] установили, что между общим содержанием фенольных соединений и антиоксидантной, антирадикальной активностью овощей семейства крестоцветных есть положительная корреляция. Эти химические вещества способны воздействовать на уровень холестерина и другие факторы, влияющие на здоровье системы кровообращения [3, 4], поэтому диеты, богатые флавоноидами, помогают предотвратить сердечно-сосудистые заболевания. Кроме того, в научной литературе отмечается биологическая активность *Brassicaceae* при лечении таких хронических заболеваний, как ожирение, диабет 2 типа, рак и остеопороз [5, 6].

В зарубежных научных публикациях в качестве источника биологически активных веществ (БАВ) все чаще рассматривается цветная капуста. Высокое содержание фенольных соединений наблюдается не только в ее съедобном соцветии, но и в отходах – листьях и стеблях, которые рассматриваются как побочные продукты переработки цветной капусты и потенциальный источник БАВ (таблица 1). Особенно много фенольных соединений содержится в верхней ножке ($(37,8 \pm 2,1)$ мг/г сухой массы) и листьях ($(15,8 \pm 0,2)$ мг/г сухой массы) растения. Отсюда возникает задача максимально эффективного использования фенольных соединений из остатков цветной капусты с получением ценных БАВ.

Таблица 1. Содержание фенольных соединений в цветной капусте

Table 1. Content of phenolic compounds in cauliflower

Часть растения	Содержание ФС		Источник
	наименование вещества	количество	
лист (прожилки, сердцевина)	глюкозинолаты, определяемые как аллилизотиоцианат	$(5,0 \pm 0,2)$ мг/г сухой массы	[7]
верхняя ножка		$(7,3 \pm 0,2)$ мг/г сухой массы	
листья, стебли	синигрин	$(5,0 \pm 1,5)$ мкмоль/г сухой массы	[8]
	глюкоиберин	$(5,0 \pm 1,7)$ мкмоль/г сухой массы	
лист (прожилки, сердцевина)	флавоноиды	$(10,5 \pm 0,1)$ мг рутина/г сухой массы	[7]
верхняя ножка		$(27,0 \pm 1,6)$ мг рутина/г сухой массы	
лист (прожилки, сердцевина)	содержание ФС	$(15,8 \pm 0,2)$ мг/г сухой массы	
верхняя ножка		$(38,0 \pm 2,1)$ мг/г сухой массы	
соцветия	кверцетин	$(25,0 \pm 6,5)$ мг/г свежей массы	[9]
	кемпферол	$(12,0 \pm 4,3)$ мг/г свежей массы	

По данным Росстата, прогноз рынка цветной капусты в РФ имеет тенденцию к росту в среднем на 3–5% ежегодно, что приводит к увеличению образования отходов производства цветной капусты, достигающих до 60% от первоначальной массы растения во всей цепочке поставок от выращивания до переработки. Так, в 2023 году образование побочных продуктов производства цветной капусты только в Северо-Западном регионе составило по разным оценкам от 245 до 330 т [10], что позволяет их отнести к крупнотоннажным отходам растениеводства. При этом высоким содержанием фенольных соединений отличаются побочные продукты производства цветной капусты [7, 11], что актуализирует исследования в области переработки таких растительных отходов, как стебли и внешние листья с получением биологически активных веществ [12].

Однако переработка данных отходов требует потребления ресурсов и может создавать ряд проблем с точки зрения безопасности как для человека, так и для окружающей среды, связанных с образованием новых токсичных отходов, логистикой [13]. В связи с этим важным становится поиск эффективной технологии, учитывающей не только технологические и экономические, но и экологические аспекты. Приоритетным в решении этой задачи является определение рационального способа проведения процесса экстрагирования для достижения более высокого выхода фенольных соединений при минимальном потреблении ресурсов.

Фенольные соединения могут быть извлечены из растительного сырья с помощью различных экстрагентов, при выборе которых необходимо учитывать способность соединений растворяться и переходить из растительной матрицы в экстрагент [14]. Отмечено, что в целом ФС растворимы в воде,

но такие соединения как флавоноиды хуже растворяются в воде и требуют использования более токсичных и дорогих экстрагентов, таких как этанол, метанол [15].

Среди методов экстракции растительного сырья широко распространен усовершенствованный метод мацерации и отваривания, известный как метод Сокслета [13]. Метод мацерации с перемешиванием выбран для данного исследования ввиду его распространенности и простоты реализации. В большинстве экспериментов с применением метода мацерации в качестве растворителей применяются вода и этанол, что требует продолжительного времени и характеризуется низким выходом биологически активных веществ [13]. К недостаткам традиционного метода относятся и термическая деградация БАВ и, соответственно, необходимость использовать более токсичные растворители, что достаточно энергозатратно [16, 17]. Все это ограничивает применение извлеченных соединений в пищевой промышленности. В этой связи большой интерес вызывают нетрадиционные методы, например экстракция с помощью ультразвуковой обработки, особенно фенольных соединений и изотиоцианатов из различных растительных материалов, пищевых отходов и побочных продуктов отрасли [18].

Ультразвуковое воздействие вызывает в растворителях, используемых для экстрагирования, образование пузырьков кавитации, которые резко схлопываются, что приводит к более интенсивному разрушению стенок клеток, улучшая диффузионные процессы и обеспечивая более высокую скорость экстракции [19]. В результате биологически активные вещества выводятся из растительных клеток при наличии градиента массопереноса [20].

Методы ультразвуковой обработки исследуются при варьировании таких параметров, как вид экстрагента, продолжительность экстракции, гидромодуль, мощность ультразвука [21, 22]. При установлении оптимального режима скорость экстракции увеличивается. Так, в работе [23] показано увеличение скорости экстракции сульфорафана из семян брокколи в 4 раза при ультразвуковой обработке с применением горячей воды в качестве экстрагента по сравнению с этилацетатом, что делает процесс экстракции более быстрым и менее токсичным.

Рассмотренные публикации демонстрируют эффективность экстракции с применением ультразвуковой обработки, но в них нет анализа воздействия на окружающую среду и не проводится экономическая оценка получения фенольных соединений из растительного сырья.

Стоит отметить, что шрот, образующийся в результате экстракции и представляющий собой отход, в случае применения нетоксичного экстрагента может быть использован повторно, например, при компостировании, что хорошо согласуется с принципами экономики замкнутого цикла. Возврат растительных отходов приводит к сохранению устойчивости экосистемы и обеспечивает круговорот веществ, улучшающих плодородие и структуру почвы, и поэтому данный фактор необходимо учитывать при изучении способов переработки растительных отходов [24].

Целью настоящего исследования является выбор рационального метода экстракции фенольных соединений из листьев цветной капусты с учетом технологических и эколого-экономических аспектов. Для ее достижения решались следующие задачи: проанализировать эффективность мацерации и ультразвуковой экстракции фенольных соединений из листьев цветной капусты в многофакторном эксперименте при варьировании экстрагентов, продолжительности экстракции, гидромодуля и мощности ультразвука; расчетным путем оценить энергопотребление и эксплуатационные затраты, а также экологическое воздействие по категориям углеродный след, эвтрофикация пресных вод и закисление почв.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись водный и водно-этиловый экстракты из листьев цветной капусты сорта Мовир-74 (Россия), собранные на территории растениеводческого хозяйства, расположенного в Гатчинском районе Ленинградской области. В качестве экстрагентов использовали дистиллированную воду и водно-этиловый раствор с содержанием 80% этилового спирта по ГОСТ 5962-2013.

Механическое измельчение сухого сырья проводили с помощью электрической мельницы модель HR3000 (Foodatlas, Китай); частицы отбирали при помощи сит с ячейками от 1 до 2 мм.

Во всех экспериментах с рассматриваемыми методами экстракции температура оставалась постоянной, равной 60°C.

Метод мацерации осуществляли с применением верхнеприводной мешалки OHS-20 (VELP Scientifica, Италия), мощностью 200 Вт. Экстракция проводилась в водно-этиловом (опыты 1–4) и водном растворе (опыты 5–8) согласно плану двухфакторного эксперимента (таблица 2 и 3). Метод ультразвуковой обработки по плану трехфакторного эксперимента (опыты 9–16, таблица 4) предусматривал экстракцию биологически активных соединений из листьев цветной капусты с применением ультразвуковой ванны ГРАД 40-35 (НТК Солтек, Россия), мощность ТЭН: 150 Вт, скорость нагрева ванны – один градус в минуту. Параметры обработки ультразвуком: частота 35 кГц.

Для исследования ультразвуковой экстракции проводили полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^n , где n – число факторов варьирования [25].

В таблицах 2–4 использовали следующие обозначения факторов: X_1 – гидромодуль, г/мл; X_2 – продолжительность экстракции, мин; X_3 – мощность ультразвука, Вт, (Вт/г); X_{oi} – среднее значение фактора; $X_{i\Delta}$ – интервал дискретности фактора.

Целевой функцией является общее содержание фенольных соединений, извлекаемых из листьев цветной капусты (мг/100 г), в пересчете на галловую кислоту [26].

Содержание фенольных веществ определяли спектрофотометрическим методом с применением фенольного реактива Фолина–Чокальтеу [26]. Оптическую плотность растворов определяли на спектрофотометре ПЭ-5400УФ (Промэколаб, Россия), применяли кварцевые кюветы с толщиной слоя 10 мм при длине волны 765 нм.

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программы Microsoft Excel по критериям Стьюдента (3,18) и Кохрена (0,939). Выполнена оценка дисперсии для каждой серии опытов (S_r^2) и общей дисперсии воспроизводимости опытов (S_R). Во всех опытах исследовали по четыре параллельные пробы.

При определении эксплуатационных затрат на извлечение ФС учитывали затраты на приобретение экстрагентов – питьевой воды и этилового спирта 96,3% (ГОСТ 5962-2013). Потребление электроэнергии рассчитывали по мощности оборудования и продолжительности процесса экстракции. Затраты на электроэнергию и воду питьевую рассчитывали по тарифам Ленинградской области: вода – 63,65 руб./м³, электроэнергия – 8,51 руб./кВт·ч, спирт по цене 680 руб. за 1 л.

Для оценки экологического воздействия процесса экстракции рассчитывали углеродный след, эвтрофикацию пресных вод и закисление почв, образующихся в результате потребления электроэнергии и экстрагентов, применялся программный продукт SimaPro 9.1.1.1 с базой данных Ecoinvent; расчет углеродного следа проводился по методу IPCC 2013 GMP 500, закисление почв и эвтрофикация пресных вод по методу ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04/World (2010) H.

Результаты и их обсуждение

Полный факторный эксперимент был проведен для определения суммы ФС методом мацерации в водно-этиловом экстракте (таблица 2), в водном растворе (таблица 3) и ультразвуковой экстракцией в водно-этиловом растворе (таблицы 4).

Таблица 2. Результаты двухфакторного эксперимента экстракции ФС методом мацерации в водно-этиловом экстракте

Table 2. Results of the two-factor experiment on extraction of phenolic compounds by maceration in aqueous-ethyl extract

Опыты	Значения нормированных переменных		Значения натуральных переменных		Содержание ФС, мг/100 г	S_r^2
	X_1	X_2	гидромодуль, г/мл	продолжительность экстракции, мин		
1	–1	–1	1:30	30	242	5,5
2	–1	+1	1:30	60	404	2,0
3	+1	–1	1:40	30	264	4,4
4	+1	+1	1:40	60	419	4,8
X_{oi}			1:35	45		
$X_{i\Delta}$			5	15		

Общая дисперсия воспроизводимости опытов $S_R = 4,4$

Расчетное значение критерия Кохрена (G_r) для средних значений общего содержания фенольных соединений составляет 0,39. Следовательно, массив данных является воспроизводимым, а дисперсии – однородными.

Для наиболее рационального режима экстрагирования фенольных соединений из листьев цветной капусты в водном растворе следует выдерживать следующие условия: продолжительность экстрагирования – 60 мин при гидромодуле – 1:40 г/мл (опыт 4).

Результаты двухфакторного эксперимента по экстракции фенольных соединений методом мацерации в водном растворе при тех же режимах обработки показывают меньший суммарный выход фенольных соединений в сравнении со спиртовым раствором (таблица 3).

Таблица 3. Результаты двухфакторного эксперимента по экстракции ФС методом мацерации в водном растворе
Table 3. Results of a two-factor experiment on extraction of phenolic compounds by maceration in aqueous solution

Опыты	Значения нормированных переменных		Значения натуральных переменных		Содержание ФС, мг/100 г	S_r^2
	X_1	X_2	гидромодуль, г/мл	продолжительность экстракции, мин		
5	-1	-1	1:30	30	218	9,0
6	-1	+1	1:30	60	344	3,2
7	+1	-1	1:40	30	246	11,8
8	+1	+1	1:40	60	375	2,3
X_{oi}			1:35	45		
$X_{i\Delta}$			5	15		

Общая дисперсия воспроизводимости опытов $S_R = 7,7$

Критерий Кохрена для средних $G_r = 0,59$, что подтверждает однородность всех выборок плана.

Рациональный режим экстрагирования методом мацерации в водном растворе следующий: продолжительность – 60 мин, гидромодуль – 1:40 г/мл (опыт 8).

В результате проведения многофакторного эксперимента выявлено влияние трех факторов на экстракцию с применением ультразвуковой обработки в водно-этиловом растворе (таблица 4).

Таблица 4. Результаты ПФЭ эксперимента экстракции ФС с применением ультразвуковой обработки в водно-этиловом растворе

Table 4. Results of FFE experiment on extraction of phenolic compounds by ultrasonic treatment in water-ethyl solution

Опыты	Значения нормированных переменных			Значения натуральных переменных			Содержание ФС, мг/100 г	S_r^2
	X_1	X_2	X_3	гидромодуль, г/мл	продолжительность экстракции, мин	мощность ультразвука, Вт, (Вт/г)		
9	-1	-1	-1	1:30	30	82,5 (3,59)	288	5,3
10	-1	+1	-1	1:30	40	82,5 (3,59)	275	16,6
11	+1	-1	-1	1:40	30	82,5 (2,72)	282	10,4
12	+1	+1	-1	1:40	40	82,5 (2,72)	268	3,6
13	+1	-1	+1	1:40	30	115,5 (3,17)	443	11,2
14	-1	+1	+1	1:30	40	115,5 (4,19)	435	11,8
15	-1	-1	+1	1:30	30	115,5 (4,19)	448	10,9
16	+1	+1	+1	1:40	40	115,5 (3,17)	432	3,8
X_{oi}				1:35	35	99,0		
$X_{i\Delta}$				5	5	16,5		

Общая дисперсия воспроизводимости опытов $S_R = 9,2$

Критерий Кохрена для средних $G_r = 0,33$, что подтверждает однородность выборки.

Рациональный режим экстракции ФС установлен следующий: гидромодуль – 1:30 мл/г; продолжительность экстракции – 30 мин; мощность ультразвука – 115,5 Вт (4,19 Вт/г) (опыт 15).

Важными факторами при экстрагировании биологически активных веществ с применением ультразвука являются мощность ультразвука, гидромодуль, продолжительность обработки. В ряде работ указывается, что эти факторы влияют на эффективность экстракции фенольных соединений, в том числе при ультразвуковой экстракции [27, 28].

Изучение влияния гидромодуля и продолжительности обработки актуально для поиска рационального режима и масштабирования процессов экстракции. В работах [29–31] при большом гидромодуле наблюдается увеличение концентрации фенольных соединений за счет снижения вязкости системы и улучшения диффузии. Отмечается, что избыток растворителя способствует поддержанию высокого градиента концентрации, улучшая массоперенос.

Мацерация, несмотря на простоту реализации и достаточно широкое промышленное применение, характеризуется длительностью процесса (до 24 ч) и риском окисления целевых продуктов [29]. Ультразвуковая экстракция обеспечивает интенсификацию массопереноса за счет возникающего кавитационного эффекта, сокращая время обработки.

Для ультразвуковой экстракции продолжительная обработка может обеспечить баланс между полнотой извлечения и минимизацией термической деградации [32]. Так в работе [27] при ультразвуковой экстракции высокий выход фенольных соединений из растительного сырья наблюдался при продолжительности экстракции 45 мин.

Ультразвуковая экстракция демонстрирует преимущество перед мацерацией по скорости и выходу ФС, что подтверждается в работе [33]. При экстракции из тыквы и персиков оптимальные условия ультразвуковой экстракции обеспечили выход, сопоставимый с 150-минутной мацерацией, но с меньшим расходом этанола в два раза. Экспериментальные данные, полученные с помощью электронного микроскопа, подтверждают, что скорость массопереноса фенольных соединений увеличивается из-за повреждений клеток образцов под действием ультразвука.

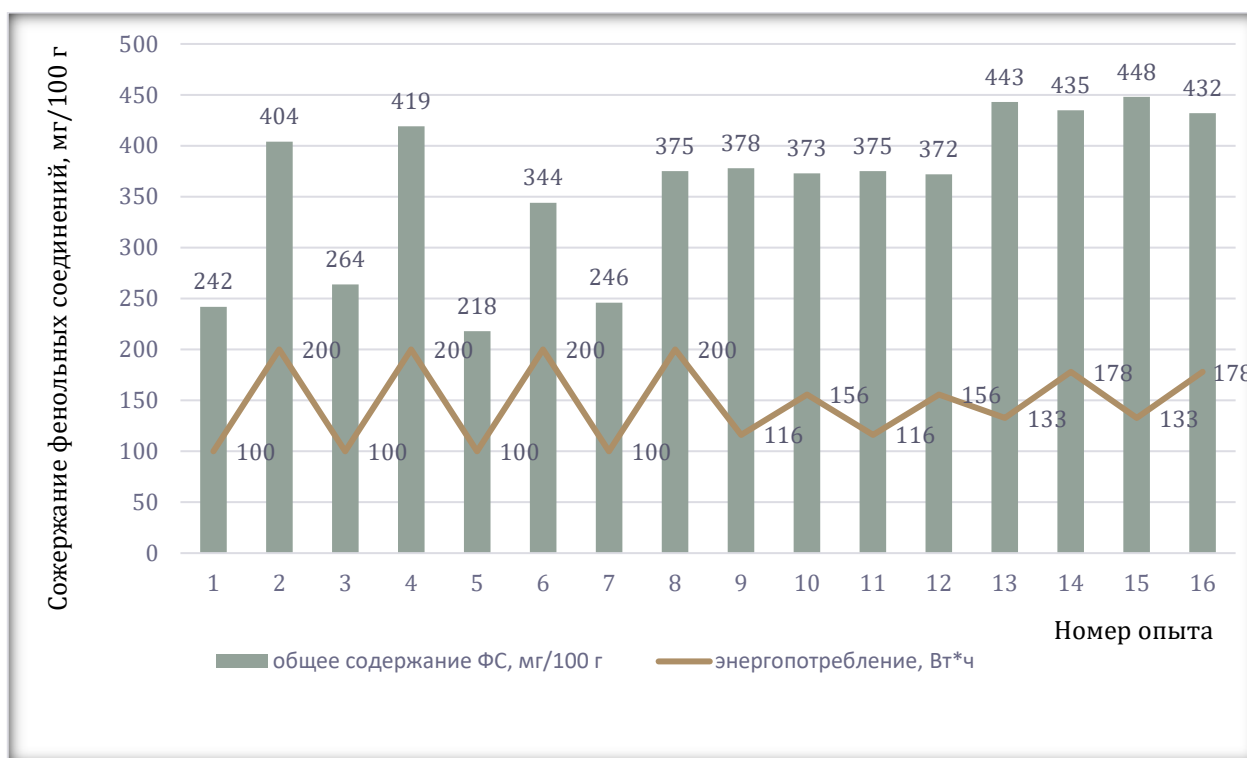


Рисунок 1 – Содержание ФС в экстрактах, полученных методом мацерации и ультразвуковой экстракции: опыты 1–4 – мацерация в водно-этиловом растворе; опыты 5–8 – мацерация в дистиллированной воде; опыты 9–16 – ультразвуковая обработка в водно-этиловом растворе

Figure 1. Content of phenolic compounds in extracts obtained by maceration and ultrasonic extraction: experiments 1–4 – maceration in water-alcohol solution; experiments 5–8 – maceration in distilled water; experiments 9–16 – ultrasonic treatment in water-alcohol solution

Полученные авторами результаты согласуются также с исследованиями извлечения полисахаридов из *Ziziphus jujuba*, где за счет ультразвуковой экстракции сократилось время обработки с 2 ч до 15 мин при сопоставимом выходе [34, 35] фенольных соединений из *Laurus nobilis* в течение 30 мин ультразвуковой экстракции термолабильных соединений.

Наиболее эффективное экстрагирование ФС из листьев цветной капусты с точки зрения энергопотребления достигается с применением ультразвуковой обработки (рисунок 1). По сравнению с мацерацией в водно-этиловом растворе при сопоставимом максимальном извлечении фенольных соединений ультразвуковая обработка снижает потребление энергии в 1,5 раза.

Выбор рационального режима экстракции ФС из листьев цветной капусты подразумевает также оценку затрат на реализацию рассмотренных методов и углеродного следа (таблица 5).

Таблица 5. Затраты на процесс экстракции и оценка углеродного следа

Table 5. Extraction process costs and carbon footprint estimation

Опыты	Затраты на экстракцию, руб.			Углеродный след, кг CO ₂ экв		
	на 1 г сухого сырья	на 100 г сухого сырья	на 1 мг ФС	на 1 г сухого сырья	на 100 г сухого сырья	на 1 мг ФС, 10 ⁴
1	17,17	1717,12	7,10	0,06	6,23	2,48
2	18,02	1802,24	7,45	0,12	12,24	2,97
3	22,61	2261,15	9,34	0,06	6,28	2,27
4	23,46	2346,25	9,70	0,12	12,22	2,87
5	1,04	104,20	0,35	0,06	6,13	2,75
6	1,70	170,39	0,70	0,12	12,13	3,49
7	0,85	85,29	0,35	0,06	6,17	2,44
8	1,70	170,45	0,70	0,12	12,17	3,20
9	17,31	1730,97	7,15	0,08	7,70	1,98
10	17,65	1764,60	7,29	0,10	10,20	2,67
11	22,75	2274,98	9,40	0,08	7,69	1,99
12	23,09	2308,62	9,54	0,10	10,24	2,68
13	22,89	2289,02	9,46	0,08	8,24	1,80
14	17,83	1783,42	7,37	0,11	10,59	2,38
15	17,45	1745,01	7,21	0,08	8,00	1,74
16	23,27	2327,43	9,62	0,11	10,56	2,39

Применение ультразвуковой обработки по сравнению с мацерацией в водно-этиловом растворе не приводит к существенному снижению затрат на экстрагент. Издержки при максимальном извлечении ФС ультразвуковой обработкой (опыт 15) в сравнении с мацерацией (опыт 4) сокращаются в 1,3 раза.

На стоимость метода экстракции значительно влияет содержание этилового спирта (рисунок 2), поэтому для удешевления конечного продукта необходим поиск более дешевого экстрагента. Так, на рисунке 2 затраты на воду настолько малы, что не отображаются в масштабе графика. При использовании ультразвука применение водного раствора в качестве экстрагента может привести к значительному уменьшению стоимости метода и, вследствие этого, снижению электропотребления и соответствующих затрат.

Для оценки конкурентоспособности наиболее рационального метода экстракции ФС рассчитывали розничную цену флавоноидов, реализуемых в аптечной сети Санкт-Петербурга под названием «Биологически активная добавка (БАД) «Цитросепт» (Польша) во флаконе-капельнице объемом 10 мл по цене 904,10 руб. за шт. Данный БАД представляет собой экстракт семян грейпфрута. Без учета упаковки стоимость флавоноидов составляет 13,91 руб./мг. При сравнении с наилучшим режимом мацерации в водном растворе (опыт 8) затраты на фенольные соединения из листьев цветной капусты сокращаются в 8,2 раза и составляют 1,70 руб./мг.

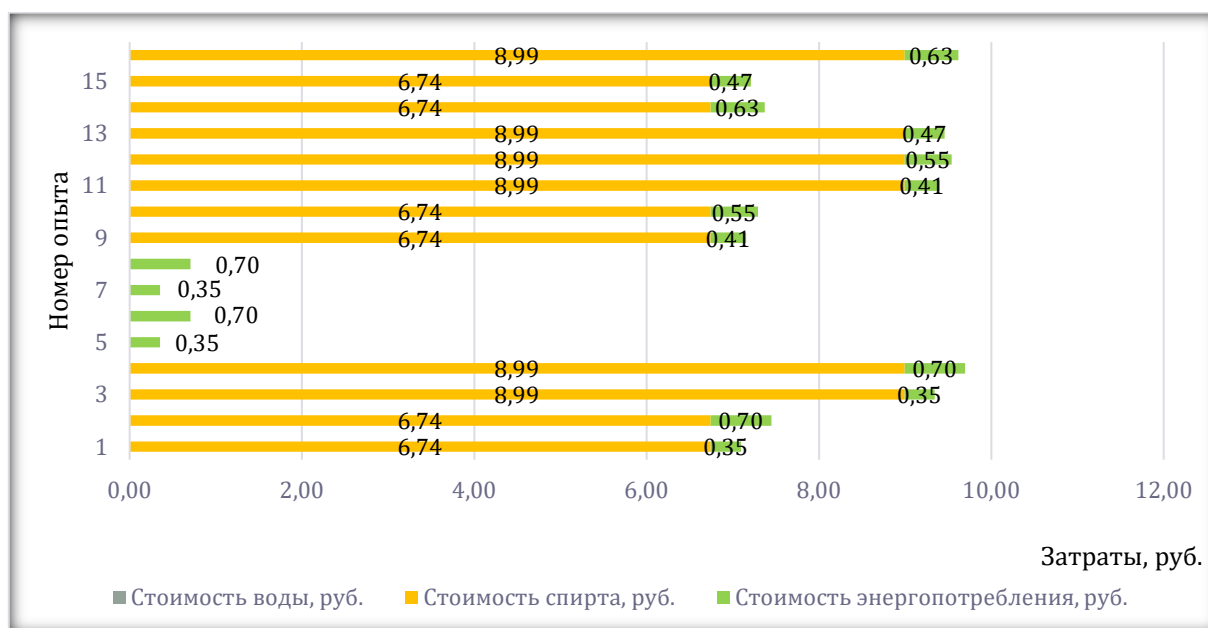


Рисунок 2 – Затраты на извлечение 1 мг ФС при различных сочетаниях варьируемых факторов экстракции: опыты 1–4 – мацерация в водно-этиловом растворе; опыты 5–8 – мацерация в дистиллированной воде; опыты 9–16 – ультразвуковая обработка в водно-этиловом растворе
 Figure 2. Extraction costs for different combinations of variable extraction factors for phenolic compounds: experiments 1–4 – maceration in water-alcohol solution; experiments 5–8 – maceration in distilled water; experiments 9–16 – ultrasonic treatment in water-alcohol solution

Результаты расчета углеродного следа показывают, что значительный вклад (99%) вносит энергопотребление (рисунок 3), для снижения которого необходимо сократить потребление энергии и продолжительность процесса экстракции. При большой мощности ультразвука (115,5 Вт или 4,19 Вт/г) продолжительность обработки снижается до 30 мин или в 2 раза в сравнении с мацерацией (60 мин). При этом достигается и более высокое извлечение фенольных соединений (419 мг/100 г).

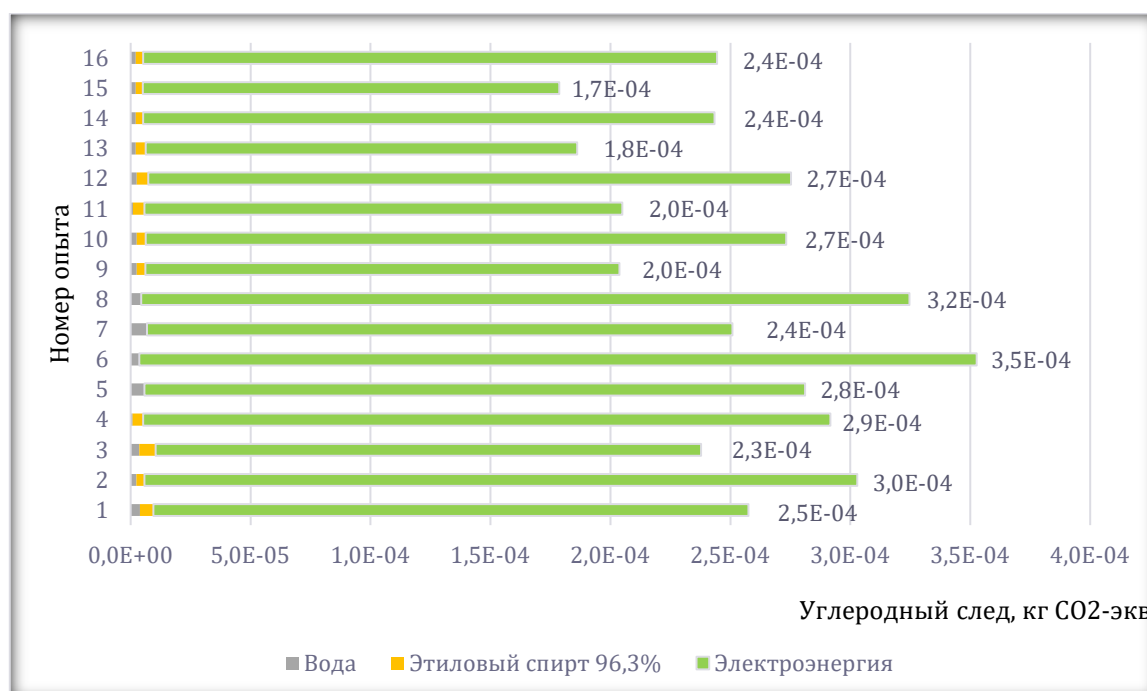


Рисунок 3 – Вклад ресурсов в углеродный след при различных сочетаниях варьируемых факторов экстракции ФС: опыты 1–4 – мацерация в водно-этиловом растворе; опыты 5–8 – мацерация в дистиллированной воде; опыты 9–16 – ультразвуковая обработка в водно-этиловом растворе
 Figure 3. Resource contribution to the carbon footprint under different combinations of varying extraction factors for phenolic compounds: experiments 1–4 – maceration in water-alcohol solution; experiments 5–8 – maceration in distilled water; experiments 9–16 – ultrasonic treatment in water-alcohol solution

Сокращение энергопотребления при ультразвуковой обработке происходит за счет сокращения продолжительности экстракции, поэтому данный метод является потенциально экологически более эффективным по сравнению с методом мацерации.

Потребление электроэнергии так же значимо для таких категорий воздействия, как эвтрофикация пресных вод и закисление почв (рисунки 4 и 5). Более продолжительная обработка мацерацией с использованием водно-этилового раствора оказывает существенное влияние по сравнению с ультразвуковой экстракцией. В свою очередь, ультразвуковая экстракция уступает мацерации в водном растворе, что требует поиска менее токсичных реагентов. Кроме того, для применения этилового спирта в качестве экстрагента нужна отгонка спирта, что ведет к увеличению энергопотребления.

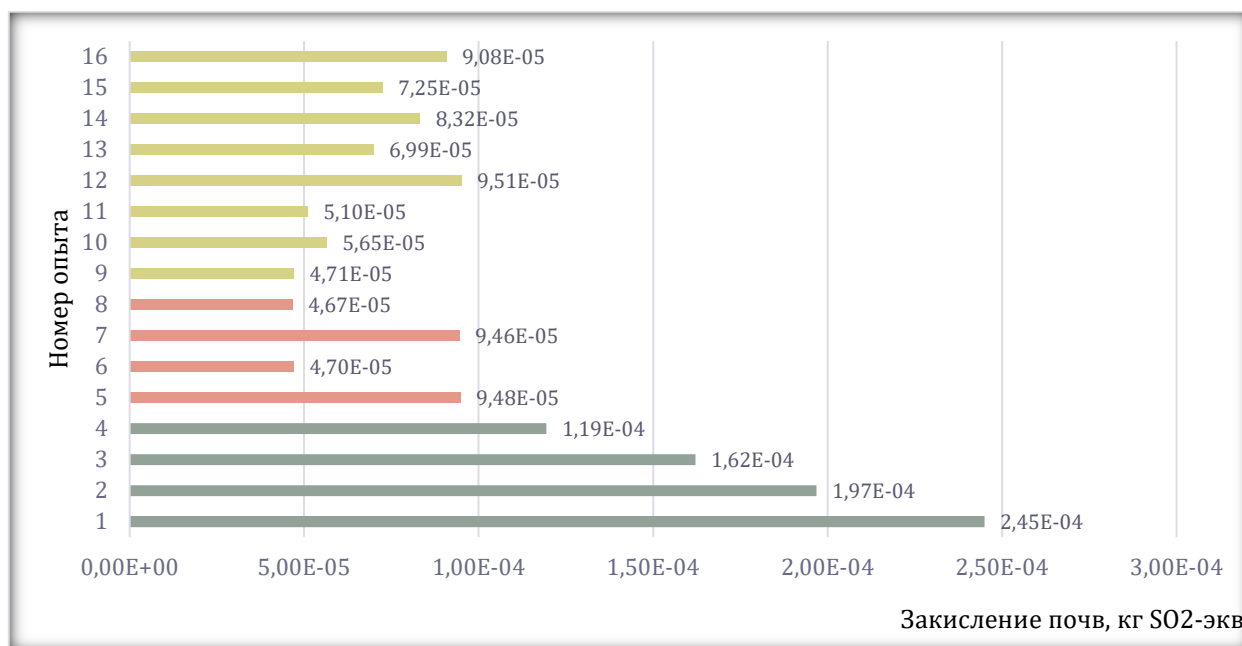


Рисунок 4 – Воздействие методов экстракции на категорию закисление почв
Figure 4. Effect of extraction methods on soil acidification

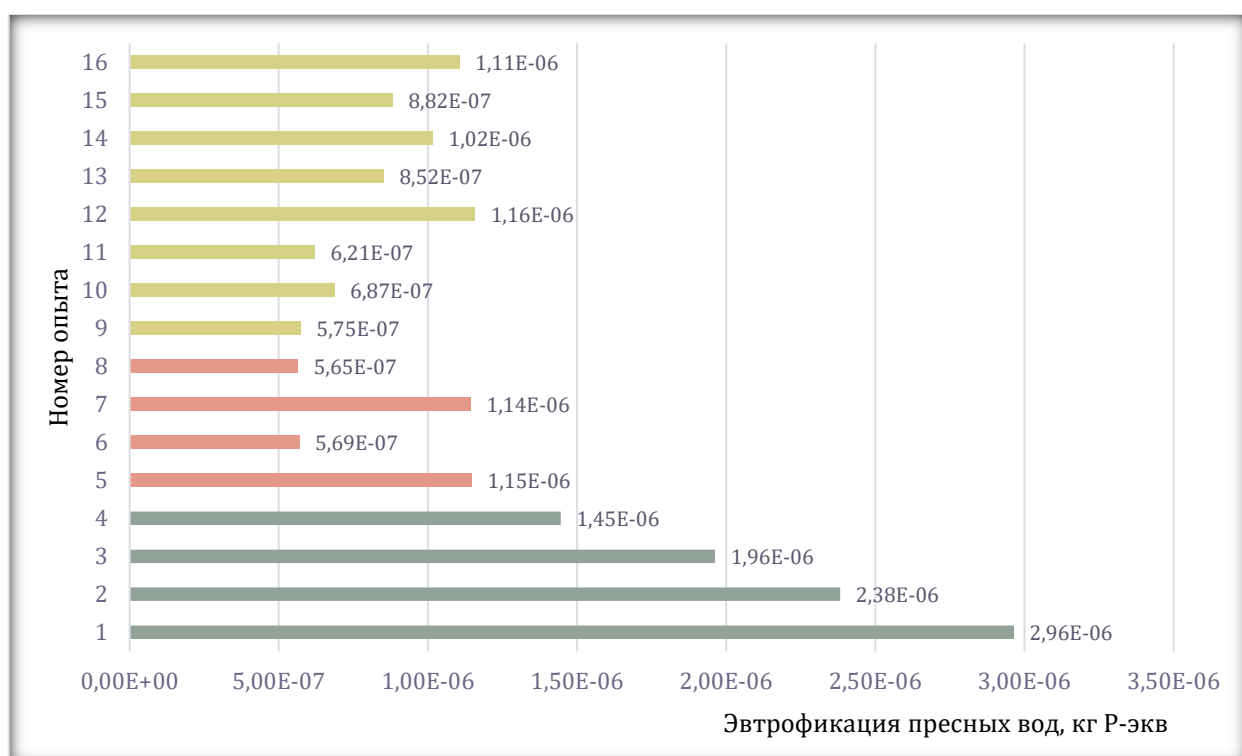


Рисунок 5 – Воздействия методов экстракции на категорию эвтрофикация пресных вод
Figure 5. Effects of extraction methods on freshwater eutrophication

Стоит отметить, что выбор категорий воздействия необходимо осуществлять с учетом местных условий, где реализуется технология и осуществляется сбор и подготовка сырья. В настоящей работе наряду с углеродным следом исследуются категории эвтрофикации и закисления почв. Целесообразно рассматривать минимальный набор категорий воздействия на окружающую среду, характерных для экологических проблем в регионах, где развивается растениеводство.

Таким образом, поиск технологически эффективного, экономически обоснованного и экологически безопасного метода экстракции требует применения системного подхода на стадии разработки, исходя из цели и задач исследования, особенно в условиях неоднозначного выбора наилучшего варианта.

В условиях эксперимента с целью разработки новых методов экстракции с получением пищевых ингредиентов из растительного сырья проводится в основном определение выхода полезного продукта, т. е. технологический показатель, поскольку именно данный критерий определяет выход целевого продукта, что важно для производителя.



Рисунок 6 – Методология комплексного исследования экстракции с учетом технологических, экономических и экологических аспектов

Figure 6. Methodology for a comprehensive extraction study taking into account technological, economic, and environmental aspects

При ужесточении экологических требований, особенно в отношении углеродной нейтральности¹ новых продуктов и процессов, становится актуальной минимизация углеродного следа, т. е. суммарных выбросов в цепочке создания продукции. В связи с этим важной исследовательской задачей является разработка технологий с минимальным потреблением энергии и продолжительностью экстракции. Отражение экологических аспектов при разработке новых технологий требует формирования

¹Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации». М., 2023, 22 с.

методологической основы и сбора данных для дальнейшего выполнения полной экологической оценки жизненного цикла и оценки затрат на производство (рисунок 6).

Комплексный подход к анализу и выбору наилучшего метода среди разнообразных вариантов уже на этапе разработки технологии позволяет минимизировать издержки и будущие потери. При неоднозначных выводах о выборе метода необходим механизм и способ принятия обоснованного решения. Такой подход развивается в ряде научных исследований и позволяет решать широкий круг задач, например, в рамках климатической повестки [36] и урбанизации [37].

В работе [38] подчеркивается необходимость учета критериев устойчивости технологий на ранних стадиях разработки и предлагается рассматривать не только эколого-экономические, но и социальные аспекты. При этом принятие решений базируется на многокритериальной оценке с применением более широкого круга таких критериев, как технологические, стратегические, культурные, политические, правовые и системные аспекты. Наряду с получением экспериментальных данных применение дополнительных критериев для выбора технологии способствует развитию системного подхода при разработке новых продуктов.

Исследования в области выбора устойчивых технологий и процессов представляются актуальными для будущего рассмотрения в рамках экологизации пищевых систем. Проведение комплексного анализа на каждой стадии жизненного цикла, начиная от процесса подготовки растительного сырья и заканчивая процессом утилизации отходов экстракции и упаковки, позволит провести полную экологическую оценку жизненного цикла (ОЖЦ). Интеграция ОЖЦ в систему многокритериальной оценки позволит не только получить дополнительную информацию для принятия решения, но и расширить границы исследования за счет всей цепочки создания продукции, не ограничиваясь только стадией переработки сырья и производства полезного продукта.

Заключение

Поиск режима с наибольшим выходом целевого продукта является актуальной задачей в связи с необходимостью экологизации пищевых систем в рамках экономики замкнутого цикла, включая, в том числе и процессы экстрагирования ФС из листьев цветной капусты с применением ультразвуковой обработки и разных экстрагентов.

Ультразвуковая обработка приводит к незначительному снижению затрат экстрагента в сравнении с мацерацией – в 1,3 раза. Однако продолжительность обработки при ультразвуковой экстракции сокращается в 2 раза. Как результат, снижаются энергопотребление в 1,5 раза и углеродный след в 1,7 раза, что повышает экологическую эффективность ультразвуковой экстракции.

При рассмотрении методов экстракции фенольных соединений из листьев цветной капусты мацерацией и с применением ультразвуковой обработки с учетом только технологических аспектов, определяемых на основании многофакторного эксперимента, сложно отдать предпочтение какому-то одному методу. Для выбора рационального способа экстракции целесообразно учитывать также экономические и экологические аспекты. Как показывает выполненный анализ, затраты на экстрагенты значительно влияют на конечную стоимость продукта. Оценка углеродного следа, закисления почв и эвтрофикации пресных вод показала, что наибольший вклад по данным категориям экологического воздействия вносит энергопотребление за счет продолжительности экстракции, и, следовательно, необходима интенсификация режимов обработки экстракцией для увеличения выхода фенольных соединений при снижении времени обработки.

Полученные результаты подтверждают необходимость многокритериальной оценки для выбора рационального метода экстрагирования с наименьшими эксплуатационными затратами, энергопотреблением и экологическим воздействием, и более экологически безопасными экстрагентами.

Литература

1. Li Z., Lee H., Liang X., Dong L., Wang Q., Huang D., Ong C. Profiling of phenolic compounds and antioxidant activity of 12 cruciferous vegetables. *Molecules*. 2018, no. 23, article 11139. DOI: 10.3390/molecules23051139
2. Radunz M., Camargo T.M., Raphaelli C.d.O., Radunz A.L., Gandra E.A., Zavareze E.d.R. Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of broccoli, kale, and cauliflower extracts. *Plant Foods Hum Nutrition*. 2024, no. 79, pp. 700–706. DOI: 10.1007/s11130-024-01212-8

3. Calderon-Montano J.M., Burgos-Moron E., Perez-Guerrero C., Lopez-Lazaro M. A review on the dietary flavonoid kaempferol. *Mini Rev Med Chem*. 2011, V. 11, no. 4, pp. 298–344. DOI: 10.2174/138955711795305335
4. Ackland M.L., van de Waarsenburg S., Jones R. Synergistic antiproliferative action of the flavanols quercetin and kaempferol in cultured human cancer cell lines. *In Vivo*. 2005, V. 19, no. 1, pp. 69–76.
5. Chen G.C., Koh W.P., Yuan J.M., Qin L.Q., van Dam R.M. Green leafy and cruciferous vegetable consumption and risk of type 2 diabetes: Results from the Singapore Chinese Health Study and meta-analysis. *The British Journal of Nutrition*. 2018, V. 119, no. 9, pp. 1057–1067. DOI: 10.1017/S0007114518000119
6. Lopez-Chillon M.T., Carazo-Diaz C., Prieto-Merino D., Zafrilla P., Moreno D. A., Villano D. Effects of long-term consumption of broccoli sprouts on inflammatory markers in overweight subjects. *Clinical Nutrition*. 2019, V. 38, no. 2, pp. 745–752. DOI: 10.1016/j.clnu.2018.03.006
7. Aboulfadl M. Nutritional and chemical evaluation of white cauliflower by-products flour and the effect of its addition on beef sausage quality. *Journal of Applied Sciences Research*. 2012, V. 8, no. 2, pp. 693–704.
8. Cabello-Hurtado F., Gicquel M., Esnault M.-A. Evaluation of the antioxidant potential of cauliflower (*Brassica oleracea*) from a glucosinolate content perspective. *Food Chemistry*. 2012, V. 132, Is. 2, pp. 1003–1009. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.11.086
9. dos Reis L.C.R. de Oliveira V.R., Hagen M.E.K., Jablonski A., Flores S.H., de Oliveira Rios A. Carotenoids, flavonoids, chlorophylls, phenolic compounds and antioxidant activity in fresh and cooked broccoli (*Brassica oleracea* var. *Avenger*) and cauliflower (*Brassica oleracea* var. *Alphina* F1). *Food Science and Technology*. 2015, V. 63, Is. 1, pp. 177–183. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.03.089
10. Dhillon G.S., Bansal S., Oberoi H.S. Cauliflower waste incorporation into cane molasses improves ethanol production using *Saccharomyces cerevisiae* MTCC 178. *Indian Journal of Microbiology*. 2007, V. 47, pp. 353–357. DOI: 10.1007/s12088-007-0063-1
11. Gonzales G.B., Raes K., Van Camp J. Combined alkaline hydrolysis and ultrasound-assisted extraction for the release of nonextractable phenolics from cauliflower (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) waste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014, V. 62, Is. 15, pp. 3371–3376. DOI: 10.1021/jf500835q
12. Hashem A., Mohamed E.A.M., Adawy E. Utilization the use of cauliflower waste extracts as a natural antioxidant to improve quality of beef sausage. *Egypt J Food Sci*. 2021, V. 49, no. 2, pp. 199–211. DOI: 10.21608/ejfs.2021.43075.1079
13. Rasera G.B., Bridi R., Danielski R., Shahidi F., de Camargo A.C. Phenolic antioxidants in the framework of Sustainable Development Goals: how far are we from zero waste? *Current Opinion in Food Science*. 2024, V. 57, article 10116. DOI: 10.1016/j.cofs.2024.101163.
14. Chua L.S. A review on plant-based rutin extraction methods and its pharmacological activities. *J Ethnopharmacology*. 2013, V. 150, Is. 3, pp. 805–817. DOI: 10.1016/j.jep.2013.10.036
15. Chebil L., Humeau C., Anthoni J., Dehez F., Engasser J.-M., Ghoul M. Solubility of flavonoids in organic solvents. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2007, V. 52, Is. 5, pp. 1552–1556. DOI: 10.1021/je7001094
16. Yan L.-G., Deng Y., Ju T., Wu K., Xi J. Continuous high voltage electrical discharge extraction of flavonoids from peanut shells based on "annular gap type" treatment chamber. *Food Chemistry*. 2018, V. 256, pp. 350–357. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.02.129
17. Barba F.J., Grimi N., Vorobiev E. Evaluating the potential of cell disruption technologies for green selective extraction of antioxidant compounds from *Stevia rebaudiana* Bertoni leaves. *Journal of Food Engineering*. 2015, V. 149, pp. 222–228. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2014.10.028
18. Tabasso S., Carnaroglio D., Gaudino E.C., Cravotto G. Microwave, ultrasound and ball mill procedures for bio-waste valorisation. *Green Chemistry*. 2025, V. 17, pp. 684–693. DOI: 10.1039/C4GC01545B
19. Bin Mokaizh A.A., Nour A.H., Yunus R.M. Extraction and characterization of phenolic compounds from *Commiphora gileadensis* bark using ultrasonic-assisted extraction. *Pharmacological Research – Natural Products*. 2024, V. 4, article 100066. DOI: 10.1016/j.prenap.2024.100066
20. Carbonell-Rozas L., Romero-Gonzalez R., Frenich A.G. Green and miniaturized ultrasonic-assisted extraction using natural deep eutectic solvents to extract phenolic compounds from tea samples. *Advances in Sample Preparation*. 2024, V. 12, article 100128. DOI: 10.1016/j.sampre.2024.100128
21. Bouafia M., Colak N., Ayaz F. A., Benarfa A., Harrat M., Gourine N., Yousfi M. The optimization of ultrasonic-assisted extraction of *Centaurea* sp. antioxidative phenolic compounds using response surface methodology. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*. 2021, V. 25, article 100330. DOI: 10.1016/j.jarmap.2021.100330
22. Selahvarzi A., Ramezan Y., Sanjabi M. R., Namdar B., Akbarmivehie M., Mirsaeedghazi H., Azarikia F. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds from pomegranate and orange peels and their antioxidant activity in a functional drink. *Food Bioscience*. 2022, V. 49, article 101918. DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101918
23. Liu Y., Zhang D., Li X., Xiao J., Guo L. Enhancement of ultrasound-assisted extraction of sulforaphane from broccoli seeds via the application of microwave pretreatment. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022, V. 87, article 106061. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106061.
24. Sarkar R., Basak B.B., Banerjee A., Mosaffa E., Bhowmik A. Recycling of residual biomass of medicinal and aromatic plants: A valuable alternative towards bio-refinery. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*. 2025, V. 45, article 100624. DOI: 10.1016/j.jarmap.2025.100624

25. Меледина Т.В., Данина М.М. Методы планирования и обработки результатов научных исследований. СПб.: Изд-во Университета ИТМО, 2015. 110 с.
Meledina T.V., Danina M.M. Methods of planning and processing the results of scientific research. St. Petersburg, ITMO University Publ. 2015. 110 p. (In Russian)
26. Akther S., Islam Md.R., Alam M., Alam Md.J. Ahmed S. Impact of slightly acidic electrolyzed water in combination with ultrasound and mild heat on safety and quality of fresh cut cauliflower. *Postharvest Biology and Technology*. 2023, V. 197, article 112189. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2022.112189
27. Zhong X., Zhang S., Wang H., Yang J., Li L., Zhu J., Liu Y. Ultrasound-alkaline combined extraction improves the release of bound polyphenols from pitahaya (*Hylocereus undatus* 'Foo-Lon') peel: Composition, antioxidant activities and enzyme inhibitory activity. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022, V. 90, article 106213. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106213
28. Liu Y., Zhang D., Li X., Xiao J., Guo L. Enhancement of ultrasound-assisted extraction of sulforaphane from broccoli seeds via the application of microwave pretreatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, V. 87, article 106061. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106061
29. Brahmi F., Mateos-Aparicio I., Garcia-Alonso A., Abaci N., Saoudi S., Smail-Benazzouz L., Guemghar-Haddadi H., Madani K., Boulekbache-Makhlouf L. Optimization of conventional extraction parameters for recovering phenolic compounds from potato (*Solanum tuberosum* L.) peels and their application as an antioxidant in yogurt formulation. *Antioxidants (Basel)*. 2022, V. 11, Is. 7, article 1401. DOI: 10.3390/antiox11071401
30. Cannas M., Conte P., Piga A., Del Caro A. Green recovery optimization of phenolic compounds from "Spinoso sardo" globe artichoke by-products using response surface methodology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2023, V. 7, article 1215809. DOI: 10.3389/fsufs.2023.1215809
31. Gonzales G.B., Smagghe G., Raes K., Van Camp J. Combined alkaline hydrolysis and ultrasound-assisted extraction for the release of nonextractable phenolics from cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) waste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014, V. 62, Is. 15, pp. 3371–3376. DOI: 10.1021/jf500835q
32. Hiranpradith V., Therdthai N., Soonrunnarudrungsri A., Rungsuriyawiboon O. Optimisation of ultrasound-assisted extraction of total phenolics and flavonoids content from centella asiatica. *Foods*. 2025, V. 14, Is. 2, article 291. DOI: 10.3390/foods14020291
33. Altemimi A., Watson D.G., Choudhary R., Dasari M.R., Lightfoot D.A. Ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from peaches and pumpkins. *PLoS One*. 2016, V. 11, Is. 2, article e0148758. DOI: 10.1371/journal.pone.0148758
34. Qu C., Yu S., Luo L., Zhao Y., Huang Y. Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from *Ziziphus jujuba* Mill. by response surface methodology. *Chemistry Central Journal*. 2013, V. 7, Is. 1, 160. DOI: 10.1186/1752-153X-7-160
35. Muniz-Marquez D.B., Martinez-Avila G.C., Wong-Paz J.E., Belmares-Cerda R., Rodriguez-Herrera R., Aguilar C.N. Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from *Laurus nobilis* L. and their antioxidant activity. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2013, V. 20, Is. 5, pp. 1149–1154. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2013.02.008
36. Teng M., Zhang F., Gong Z., Park J.H. Evaluating climate adaptation strategies for coastal resilience using multi-criteria decision-making framework. *Marine Pollution Bulletin*. 2025, V. 217, article 118060 DOI: 10.1016/j.marpolbul.2025.118060
37. Galychyn O., Fath B.D., Shah I. H., Buonocore E., Franzese P.P. A multi-criteria framework for assessing urban socio-ecological systems: The emergent nexus of the urban economy and environment. *Cleaner Environmental Systems*. 2022, V. 5, article 100080. DOI: 10.1016/j.cesys.2022.100080
38. Hunger T., Arnold M. G., Engesser S., Gerald van den Boogaart K. Integrating sustainability facets into the early stages of new product development using multi-criteria tools - a critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2025, V. 517, article 145834. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145834

Информация об авторах

Айгуль Васимовна Миниахметова – аспирант факультета экотехнологий

Ольга Ивановна Сергиенко – канд. техн. наук, доцент факультета экотехнологий

Information about the authors

Aigul V. Miniakhmetova, Postgraduate Student, Faculty of Ecotechnologies

Olga I. Sergienko, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Faculty of Ecotechnologies

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 10.02.2025

Одобрена после рецензирования 18.06.2025

Принята к публикации 20.06.2025

The article was submitted 10.02.2025

Approved after reviewing 18.06.2025

Accepted for publication 20.06.2025