

УДК 615.322:663.914.13:621.9.048.6

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ЭКСТРАКЦИЯ ПИГМЕНТОВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ. ОБЗОР

© А.Г. Погорелов¹, Л.Г. Ипатова¹, В.Н. Погорелова¹, А.И. Панаит¹, А.А. Станкевич¹,
О.А. Суворов^{1,2*}

¹ Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН,
ул. Институтская, 3, Пущино, 142290, Россия, SuvorovOA@yandex.ru

² Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия

В настоящем обзоре обобщены и проанализированы способы выделения растительных пигментов (антоцианов, беталаинов, каротиноидов) методом ультразвуковой экстракции из вторичных растительных ресурсов пищевой промышленности. Извлечение красящих веществ из растительных отходов позволяет одновременно улучшить глубину переработки исходного сырья, снизить нагрузку на окружающую среду и увеличить объемы производства натуральных красителей. К тому же растительные пигменты представляют собой низкомолекулярные вещества, обладающие функциями физиологически активных соединений. В обзоре представлены материалы из баз данных Scopus (scopus.com), Google Scholar (scholar.google.ru) и РИНЦ (elibrary.ru), опубликованные, главным образом, за период 2019–2023 гг. Анализировали статьи, посвященные экстрагированию красящих веществ из отходов переработки пищевого растительного сырья и преимуществам ультразвуковой экстракции. Анализу подвергли 134 статьи, из них 41% публикаций вышли в последние два года. Показаны преимущества ультразвуковой экстракции, включая возможность отказаться от использования или существенно уменьшить объем органических растворителей, позволяющие определить данный метод в качестве «зеленой» технологии. Акцент сделан на распространенном в нашей стране вторичном сырье, которое накапливается после переработки клюквы и других ягод, лука, моркови, свеклы. Работы, посвященные изучению влияния ультразвука на экстракцию растительных пигментов, подтверждают актуальность темы исследований. В ряду перспективных направлений отмечают: совершенствование метода ультразвуковой экстракции, включая оптимизацию способов и режимов обработки, а также поиск эффективных комбинаций ультразвука с другими щадящими методами экстракции.

Ключевые слова: вторичные растительные ресурсы, антоцианы, каротиноиды, беталаины, кверцетины, ультразвуковая экстракция, клюква, шелуха лука, морковь, красная свекла.

Для цитирования: Погорелов А.Г., Ипатова Л.Г., Погорелова В.Н., Панаит А.И., Станкевич А.А., Суворов О.А. Ультразвуковая экстракция пигментов из растительного сырья. Обзор // Химия растительного сырья. 2025. №1. С. 31–56. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250114798>.

Введение

Агропродовольственный сектор охватывает отрасли перерабатывающей промышленности, в которых ежегодно образуются огромные объемы отходов, которые, загрязняя окружающую среду, оказывают давление на экологию [1, 2]. При этом побочные продукты сельского хозяйства содержат биологически активные вещества (БАВ) и технологически важные добавки, что позволяет рассматривать их как сырье для производства новых целевых продуктов с высокой добавленной стоимостью [1, 3–6]. Отходы пищевой промышленности представляют собой дополнительный источник питательных и фитохимических веществ, поэтому их вторичная переработка актуальна в связи с растущим спросом на пищевые ингредиенты натурального происхождения [3, 7, 8]. Такой подход перспективен в части развития экономики замкнутого цикла [9–12].

Потери и отходы плодоовощной промышленности составляют почти 60% от общего объема исходного сырья [13]. Эта отрасль, производя джемы, соки, закуски или салаты, одновременно накапливает значительное количество агропромышленных отходов, таких как семена, кожура, жмых, шелуха [2]. Одним из основных источников пищевых отходов являются фрукты и овощи, вклад которых составляет 0.5 млрд тонн

* Автор, с которым следует вести переписку.

в год [14]. Из этого объема 92% приходится на кожуру [15]. Побочные продукты переработки фруктов и овощей содержат ценные биологически активные соединения, в целом положительно влияющие на здоровье человека [14]. Основная цель утилизации отходов состоит в экстракции этих веществ, которые к тому же становятся источником полезных добавок в пищевой и фармацевтической промышленности [15–17]. Из побочных продуктов переработки фруктов и овощей могут быть извлечены различные категории соединений с высокой добавленной стоимостью, востребованные в пищевых производствах. Относительно низкая цена сырья и разнообразные функциональные характеристики целевого продукта обуславливают актуальность исследований с тем, чтобы оптимизировать технологию, повысить производительность, улучшить качество, внешний вид, вкусовые характеристики пищевых продуктов [2, 9, 18]. Ряд работ посвящен экстрагированию натуральных ингредиентов (витаминов, антиоксидантов, пигментов) из побочных продуктов переработки фруктов и овощей [1, 19–27].

Забота о здоровье привела к росту спроса на функциональные продукты питания, натуральные пищевые добавки и, в целом, на развитие экологически чистых пищевых технологий [11, 23]. Многие растительные пигменты представляют собой фитохимические вещества с полезными физиологическими функциями и фармакологическими свойствами [8, 9, 25, 28–30]. Пищевые ингредиенты из растительного сырья находят применение при разработке функциональных продуктов питания, обладающих повышенной пищевой ценностью [24, 30]. Потребитель отдает предпочтение пищевым продуктам, отвечающим концепции «чистой этикетки», т.е. свободным от искусственных красителей, антиоксидантов, консервантов или других добавок [23, 31, 32].

Экстракция веществ из растительного сырья, помимо выделения натуральных ингредиентов, решает задачу рационального использования вторичных растительных ресурсов [33]. Разработка новых стратегий более полного извлечения целевых соединений является важным фактором с точки зрения экономической эффективности. При этом учитывают характеристики растительной матрицы, выбор растворителя, соотношение жидкости и твердого вещества, температуру, давление и время экстракции [2]. Каждый метод экстракции имеет свои особенности и обеспечивает различную эффективность и качество экстракта [33, 34]. Традиционные методы экстракции просты в исполнении и основаны на использовании разнообразных полярных и неполярных органических растворителей. Их недостатки, прежде всего, обусловлены длительностью и трудоемкостью процесса, использованием значительного количества растворителей и применением высоких температур. При этом что проведение экстракции под нагреванием приводит к снижению выхода продукта вследствие разложения или деградации значительных количеств термолабильных фитохимических веществ. Использование органических растворителей оказывает негативное воздействие, так как большинство из них являются летучими, легковоспламеняющимися и токсичными [26]. Поэтому экстракцию с применением таких растворителей рассматривают как экологически вредную технологию [21, 35].

Чтобы снизить токсический эффект, уменьшая расход растворителей, и повысить эффективность экстракции, внедряют экологически чистые «зеленые» технологии, которые дополняют или заменяют традиционные способы [11, 21, 36]. «Зеленые» технологии должны свести к минимуму производство отходов и использование опасных веществ [14, 26], а также снизить эксплуатационные расходы и потребление энергии [1]. К таким подходам относят микроволновую и ультразвуковую экстракцию, обработку импульсным электрическим полем или с помощью ферментов, экстракцию при температуре и давлении в критической точке или под гидростатическим давлением [21, 37, 38]. Применяют также экстракцию горячей водой под давлением, после обработки разрядом плазмы или нагрева в результате пропускания импульсов электрического тока [15]. Вследствие структурного разнообразия извлекаемых веществ, а также наличия у растительной клетки относительно толстой и механически прочной целлюлозной оболочки, условия экстракции варьируют в зависимости от вида сырья [15, 29, 39–43].

Извлечение красящих веществ из вторичных растительных ресурсов пищевой промышленности и сельского хозяйства позволяет одновременно улучшить глубину переработки исходного сырья, что снижает нагрузку на окружающую среду, и увеличить объемы производства натуральных красителей. К тому же растительные пигменты представляют собой низкомолекулярные вещества, обладающие функциями физиологически активных соединений.

Анализ научной литературы показал, что в существующей картине знания важным является обзор предметного поля по следующим наиболее популярным, но недостаточно изученным направлениям в области исследуемой проблематики:

– преимущества ультразвуковой экстракции (УЗЭ);
– способы экстракции антоцианов, фенолов и флавоноидов из фруктов и ягод, флавоноидов лука, каротиноидов и беталаинов свеклы.

Обозначенные выше пробелы в знании позволили сформулировать следующее целеполагание исследования. Для систематизации способов экстракции красящих веществ из отходов переработки пищевого растительного сырья и преимуществ ультразвуковой экстракции по сравнению с другими способами извлечения пигментов необходимо получить ответы на актуальные вопросы. В их ряду: какие проводятся исследования с целью разработки оптимальных методов извлечения целевых веществ из вторичного растительного сырья? Какие решения занимают устойчивую позицию среди наиболее перспективных методов экстракции пигментов из растительного сырья, наряду с высоким выходом экстрагируемых веществ?

Целью данного обзора является анализ и обобщение данных за последние 5 лет исследований отечественных и зарубежных ученых о режимах проведения ультразвуковой экстракции пигментов из отходов переработки овощей, фруктов и ягод, в том числе в комбинации с различными растворителями или способами предобработки сырья.

Экспериментальная часть

Базы данных и временные рамки. Акценты исследования были расставлены и реализованы на диапазоне выявленных результатов в области обзора лучших практик ультразвуковой экстракции пигментов из растительного сырья. Создание настоящего обзора обосновано сложностью и многогранностью проблематики, а также отсутствием ее всестороннего анализа на основе источников последних лет в области способов выделения растительных пигментов (антоцианов, беталаинов, каротиноидов) с применением ультразвуковой экстракции. Возможность отказаться от использования или существенно уменьшить объем органических растворителей позволяет определить ультразвуковую экстракцию в качестве «зеленой» технологии.

Материалами для исследования послужили публикации из баз данных Scopus, Google Scholar РИНЦ и других источников, опубликованных, главным образом, за период 2019–2023 годы в количестве 200 источников, из которых в обзор было включено 134 статьи, из них 41% публикаций вышли в последние два года. Анализировали статьи, посвященные экстрагированию красящих веществ из отходов переработки пищевого растительного сырья и преимуществу ультразвуковой экстракции по сравнению с другими способами извлечения пигментов. Акцент сделан на распространенном в нашей стране вторичном сырье, которое накапливается после переработки клюквы и других ягод, лука, моркови, свеклы.

Критерии включения и исключения источников. Ключевыми словами для осуществления поиска в российских электронных библиотеках являлись следующие слова и словосочетания: «ультразвуковая экстракция», «антоцианы», «каротиноиды», «беталаины», «клюква», «шелуха лука», «морковь», «красная свекла». Ключевыми словами для осуществления поиска в базах данных Scopus выступили: "ultrasonic extraction", "anthocyanins", "carotenoids", "betalains", "cranberries", "onion husks", "carrots", "red beetroot".

Критерии включения и исключения для статей, подлежащих анализу, были следующими:

Критерии включения:

1. Анализируемые источники написаны в период 2019–2023 годы.
2. Статья соответствует теме исследования.
3. Типами анализируемых статей являются оригинальные исследовательские и обзорные статьи, монографии.

Критерии исключения:

1. Анализируемые источники не соответствуют теме данного обзора: не касаются области экстракции пигментов из растительного сырья.
2. Статьи, написанные не на русском или английском языках.
3. Содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники и их классифицировали только один раз.

Обсуждение результатов

Для реализации поставленной цели были систематизированы способы экстракции красящих веществ из отходов переработки пищевого растительного сырья, показаны преимущества ультразвуковой экстракции по

сравнению с другими способами извлечения пигментов. Обсуждение литературных данных разбито на тематические блоки: «Ультразвуковая экстракция», «Растительные пигменты группы антоцианов», «Антоцианы из ягод и фруктов», «Флавоноиды и антоцианы из луковой шелухи», «Каротиноиды», «Бетаиины».

Ультразвуковая экстракция. Обеспечивая эффективное извлечение веществ из растительного сырья, УЗЭ отличается простотой, низкой стоимостью и экологичностью [9, 13, 29, 44, 45]. В ряду преимуществ отмечают высокую производительность, сокращение времени обработки, снижение затрат на энергию и растворители, уменьшение выбросов углекислого газа в атмосферу, возможность извлечения термочувствительных соединений [13, 45]. УЗЭ сочетают с другими способами обработки [13, 44]. Стимулирующий характер воздействия ультразвука на процесс экстракции обусловлен активизацией турбулентного потока растворителя [46, 47], а также локальным повышением температуры с одновременным уменьшением вязкости экстрагента и возникновением кавитационных зон [45]. В результате разрушается стенка растительной клетки и уменьшается пограничный диффузионный слой и, как следствие, облегчается выход веществ из цитоплазмы [36].

Ультразвук – способ передачи энергии, генерируемой акустическими волнами частотой выше 18 кГц [33, 34]. Ультразвуковые волны приводят к кавитации и возникновению переменного давления в среде, что ускоряет экстракцию содержимого клетки [45]. Механическое воздействие ультразвука усиливает поверхностный контакт между молекулами растворителя и растительным образцом, повышает проницаемость клеточных стенок. Для разрушения клеточных структур используют ультразвук низкой частоты от 20 до 100 кГц, что способствует перемешиванию содержимого цитоплазмы и растворителя и ускоряет экстракцию из растительного образца [13, 29, 35]. Основные принципы действия ультразвуковой кавитации отображены на рисунке 1 [32].

Кавитация, нагревание, механическое воздействие и время являются основными факторами УЗЭ [29, 48–50]. Данный метод применим для выделения как полярных, так и неполярных соединений, в том числе для экстракции веществ, чувствительных к нагреванию [9, 35]. По сравнению с традиционными методами, технология обработки на основе кавитации привлекает к себе внимание благодаря низкому потреблению энергии и высокой эффективности воздействия. При кавитации высвобождается большое количество энергии за счет образования и схлопывания пузырьков, что повышает качество обработки различных растительных объектов [51]. Кавитация вызывает продольное смещение среды, инициируя чередующиеся сжатие и расширение образца, например, растительной клетки [51]. Пузырьки, образующиеся под действием ультразвука, лопаются с высвобождением энергии, порождая ударную волну и, в результате, перемешивание среды [13, 26]. Этот эффект вызывает быстрые локальные изменения давления и температуры, что приводит к разрушению клеточной стенки и, возможно, образованию свободных радикалов. Последнее обстоятельство следует учитывать во избежание деградации целевого продукта [26, 52]. Таким образом, кавитация и обусловленное ультразвуком повышение температуры способствуют проникновению растворителя в растительную матрицу с последующим ее набуханием и высвобождением целевых метаболитов в растворитель [13, 33, 50, 53, 54]. Для УЗЭ используют небольшие объемы устойчивых растворителей, что позволяет считать этот метод безопасным для окружающей среды [13, 33, 34, 55]. При этом схему погруженного в растворитель зонда считают предпочтительнее для извлечения биоактивных соединений [56].

Натуральные красители экстрагируют, как правило, из плодово-ягодного и овощного сырья или отходов их переработки, используя органический растворитель. Процесс включает мацерацию [57] с последующим удалением растворителя [18], выбор которого зависит от его совместимости с пигментом, токсичности, стоимости и степени извлечения целевого продукта [58]. Наиболее используемые растворители – это гексан, ацетон, метанол, трифторуксусная кислота [9]. Указанные жидкости представляют собой летучие взрывоопасные вещества, которые экологически небезопасны. В поиске альтернативных способов экстракции пигментов применяют комбинацию подходов [43, 59], включая УЗЭ [8]. Это эффективный метод, который позволяет не только сократить время экстракции и потребление энергии, но также избежать воздействия высокой температуры [29].

В ряду природных пигментов, используемых в пищевой промышленности, значительная доля приходится на антоцианы, каротиноиды и бетаиины [60]. Указанные соединения широко распространены в природе и выполняют разные функции, участвуя в процессах фотосинтеза, привлекая опылителей, обеспечивая защиту от хищников и солнечной энергии. Антоцианы, каротиноиды, бетаиины и порфирины относятся к

основным классам растительных пигментов, которые избирательно поглощают одни длины волн света и отражают другие [61]. В настоящем обзоре будут рассмотрены материалы, касающиеся методов выделения антоцианов из клюквы и других ягод, кверцитинов из шелухи лука, каротиноидов из моркови, бетаинов из корнеплодов красной свеклы с помощью УЗЭ.

Растительные пигменты группы антоцианов. Наблюдается растущий интерес к природным антоцианам [9, 50, 62–67], которые представляют собой большую группу растворимых в воде пигментов [9]. Переработка окрашенных ягод, фруктов, овощей в процессе производства соков, джемов, сиропов, безалкогольных напитков, вин, ликеров приводит к образованию большого количества побочных продуктов, которые можно использовать для извлечения антоцианов [9, 18, 68, 69]. Антоцианы в качестве пищевого красителя применяются в напитках, йогуртах и сухих смесях [70]. В Российской Федерации в соответствии с СанПиНом 2.3.2.1078-01 антоцианы разрешены к применению в пищевой промышленности в качестве натурального красителя для придания продуктам синего, фиолетового, красного и промежуточных цветов [31]. Помимо красящей способности антоцианы обладают высокой питательной ценностью [23] и целебными свойствами [71]. Однако их ценность для здоровья человека зависит от степени их усвояемости. После потребления богатых антоцианами продуктов в плазме крови обнаруживают лишь следовые количества этих веществ и их производных, что свидетельствует о низкой усвояемости антоцианов. Отметим то, что конъюгат антоцианов и белков обладает более высокой биодоступностью по сравнению с пигментом без пептидного носителя [72].

Антоцианы относятся к флавоноидам семейства полифенолов, которые в изобилии содержатся в тканях растений [23]. В их ряду наиболее распространены цианидин, пеонидин, пеларгонидин, мальвидин, дельфинидин и петунидин [50], химическая структура которых представляет собой полисахаридный конъюгат с положительным зарядом на атоме кислорода С-кольца, где в качестве сахара присутствует глюкоза, рутиноза, арабиноза или галактоза. Антоцианы также образуют соединения с органическими кислотами, например, яблочной или уксусной [26]. Эти пигменты устойчивы при кислых значениях pH, но разлагаются при нагревании и под действием ультрафиолета [66], что ограничивает их применение в качестве пищевых красителей. Низкомолекулярные антоцианы редко встречаются в природе, так как их стабильность возрастает с увеличением степени гликозилирования и ацилированием. Ацилированные антоцианы чаще находят в растениях и цветках, а неацилированные – в плодах. В красном луке, например, обнаруживают агликоновые производные антоцианидинов (пираноантоцианы), которые стабильны при нейтральном значении pH и более устойчивы к внешним воздействиям [23]. Нековалентное взаимодействие между белком/полисахаридом и антоцианами является ключевым фактором для стабилизации структуры антоцианов [73], обеспечивая сохранность комплекса при обработке или хранении пищевых продуктов [72, 74].

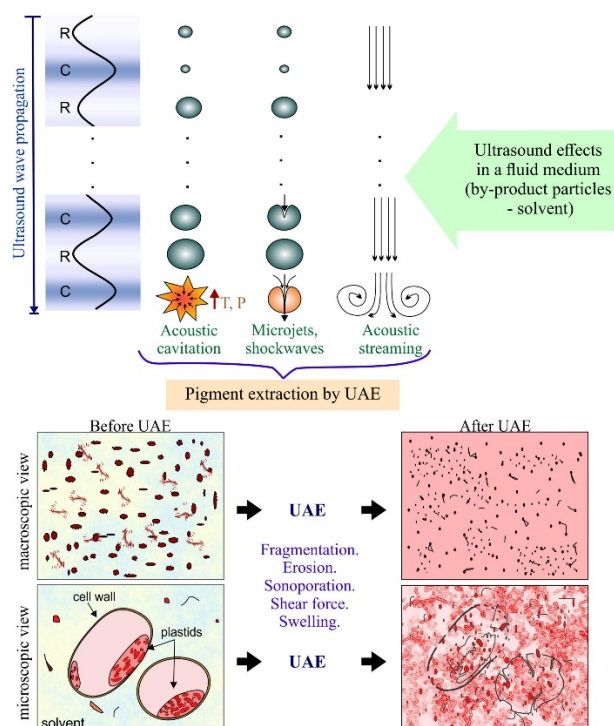


Рис. 1. Ультразвуковые эффекты, способствующие механизм извлечения пигмента при обработке ультразвуком [32]

Антоцианы извлекают из растительного сырья с помощью как традиционных, так и инновационных методов экстракции [50, 66, 75–77]. Для каждого вида экстракции характерны свои параметры, которые влияют на объем и состав целевого продукта [59, 62]. Особенности химического строения пигментов накладывают ограничения на условия экстракции, например, эти соединения разрушаются при нагревании [78]. УЗЭ рассматривают в качестве перспективного метода экстракции полифенолов и антоцианов из фруктов и ягод или отходов их переработки [36, 39, 53, 63, 79–84]. Относительно высокое содержание процианидина и антоцианов регистрировали в экстракте жмыха винограда после комбинированной обработки ультразвуком и водным раствором этанола [9, 69]. Показана возможность с помощью УЗЭ извлекать в воду антоцианы из замороженных ягод черной смородины, клюквы, брусники и китайского лимонника [85]. Известно, что этот метод экстракции обеспечивает наибольший объем извлечения антоцианов из плодов джамболана [50, 62]. На примере черники подтверждена эффективность экстракции антоцианов посредством технологии FUTE, основанной на замораживании ягоды с последующим ее оттаиванием под действием ультразвука [59]. При этом предпочтительны низкие значения частоты, что способствует лучшему образованию кавитационных пузырьков, сохраняя содержание радикалов в экстракте на низком уровне [26, 56]. Использование УЗЭ предполагает контакт ягод и экстрагента длительностью, как правило, не менее 12–30 мин [79, 85].

Антоцианы из клюквы. Клюква – одна из наиболее широко потребляемых ягод, которая содержит не только антоцианы, но и флаванолы, витамины, супероксиддисмутазу и фенольные кислоты [82, 86–89]. Антоцианы в естественном состоянии представлены в виде гликозилированного сахаром антоцианидина, присоединенного к агликону. В клюкве содержатся пеонидин-3-галактозид (48%), пеонидин-3-арабинозид (30%), цианидин-3-галактозид (11%) и цианидин-3-арабинозид (11%) [87]. Концентрация антоцианов варьирует в зависимости от сорта и стадии созревания клюквы [90] притом, что концентрация пигмента в мякоти в 6–10 раз ниже, чем в кожуре [86, 90]. По этой причине клюквенный жмых, на долю которого приходится 60% от объема перерабатываемого сырья [87], служит основным источником антоцианов.

Пигмент извлекают из ягод обычно, используя органические растворители (метанол, ацетон, этилацетат и хлороформ), также применяют и другие подходы [16, 87]. Оптимальными растворителями для экстракции неантоцианиновых полифенолов являются этанол и метанол с 1%-ной трифторуксусной кислотой или 1%-ная HCl. Технологию УЗЭ рассматривают в качестве перспективного метода выделения антоцианов из растительных источников [89]. Сравнивая различные методы экстракции, показали высокий потенциал УЗЭ для извлечения полифенолов из прессованных остатков американской клюквы [91]. В цитируемой работе подобраны оптимальные режимы экстракции: длительность УЗЭ – 15–25 мин, соотношение твердой и жидкой фаз – от 1 : 90 до 1 : 120, температура – 53 °С и концентрация этанола – 52%. Некоторые режимы экстракции антоцианов и других фенольных соединений плодов и ягод представлены в таблице 1.

Таблица 1. Ультразвуковая экстракция антоцианов, фенолов и флавоноидов из фруктов и ягод

Растительное сырье	Экстрагируемые вещества	Условия экстракции	Выход целевых веществ	Источник
1	2	3	4	5
Цедра плодов сладкого апельсина	фенолы, флавоноиды	УЗЭ, частота 20 кГц, амплитуда 70.89%, время 35 мин, температура комнатная, растворитель 50% этанол, соотношение растворитель : образец 40 мл/г	фенолы 590±0.92 мг GAE/100 г флавоноиды 104.99±0.35 мг КС/100 г	[39]
Кожура плодов груши	13 видов антоцианов, в основном, цианидин, дельфинидин, петунидин	УЗЭ, мощность 162 Вт, время 11 мин, температура 71 °С, растворители: 3% трифторуксусная кислота, 57% этанол; соотношение образец : растворитель 1 : 30 г/л	антоцианы 0.34±0.05 мг/г в эквиваленте Cy3-gal	[53]
Ягоды черники	антоцианы, цианидин-3-О-глюкозид	Технология FUTE: замораживание образцов в течение 5.43 мин в жидком азоте с последующим оттаиванием в УЗ ванне, мощность 600 Вт, частота 40 кГц, время УЗ 23.56 мин, температура 41.64 °С, растворитель 60% этанол, соотношение растворитель : образец 24.07 : 1 мл/г	антоцианы 2.53 мг/г	[59]

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
Плоды джамболана	антоцианы, в т.ч. дельфинидин-3,5-диглюкозид, петунидин-3,5-диглюкозид и мальвидин-3,5-диглюкозид	УЗ погружной зонд, плотность мощности УЗ 5000 Вт/л, время 7.5 мин, растворитель подкисленный 79.6% этанол	антоцианы 60.5 мг СуЗGE /г СВ	[62]
Кожура граната	полифенолы, в т.ч. а-пуникалагин, б-пуникалагин, эллаговая кислота	УЗ ванна, мощность 180 Вт, частота 37 кГц, режим обработки непрерывный или импульсный, время 20 мин, температура 50–60 °С, растворитель 70% этанол	общие фенолы 140–256 мг GAE/г сухого образца	[63]
Виноградные выжимки	антоцианы, полифенолы	УЗЭ генератор, температура 50 °С, растворитель смесь вода-этанол	антоцианы 4.50 мг/г образца; фенольные вещества 59.95 мг GAE/г образца	[69]
Ягоды клубники	антоцианы	УЗЭ модифицированная, мощность 120 Вт, частота 62–64 кГц, время 12 мин, температура 45 °С, растворитель 55% этанол, соотношение растворитель : образец 6 мл/г	антоцианы 796.9 мкг/г	
Ягоды черноплодной рябины, брусники, черники, малины, вишни, черной смородины	антоцианы, фенолы, флавоноиды	УЗЭ, частота $3.7 \cdot 10^5$ Гц, температура 37 °С, растворитель смесь 98% этанол : вода в соотношении 1 : 1	антоцианы, мг ЦГ/100 г исходного сырья: черноплодная рябина 859, черная смородина 112, вишня 110 мг, черника 122, брусника 89, малина 83; фенолы, мг ГК/100 г сырья: брусника 1378, черноплодная рябина 1310, черная смородина 874, вишня 858, черника 821, малина 730; флавоноиды, мг К/100 г сырья: черноплодная рябина 442, малина 92, черника 274, брусника 172, черная смородина 101, вишня 147	[80]
Жмых черники	антоцианы, в т.ч. мальвидин, дельфинидин, петунидин, цианидин; фенолы, флавоноиды	УЗ ванна, мощность 64 Вт, частота 35 кГц, температура 40 °С, вариант 1 – время 60 мин, растворитель – вода, pH 5.0, соотношение растворитель : образец 20 : 1; вариант 2 – время 40 мин, растворитель – 50% этанол, pH 6.3, соотношение растворитель : образец 15 : 1	ТАС 31.32 мг/г СВ, ТРС 22.33 мг/г СВ, TFC 19.41 мг/г СВ	[81]
жмых черники	10 видов антоцианов, в т.ч. дельфинидин, петунидин, мальвидин	УЗЭ, мощность 325 Вт, импульсный режим, время 3.2 мин, температура 349.15 К (76 °С), растворитель NADES (хлорид холина – щавелевая кислота (ChOa) – глубокий эвтектический растворитель), соотношение растворитель : образец 60 мл/г	антоцианы 24.27±0.05 мг СЗGE/г СВ	[84]
замороженные ягоды черной смородины, клюквы красной черники, китайского лимонника	антоцианы в эквиваленте мальвидин-3-гликозида	1) непрямая УЗЭ (УЗ ванна), мощность 80 Вт, частота 35 кГц, время 30 мин; 2) прямая УЗ (УЗ гомогенизатор), мощность 75 Вт, частота 20 кГц, время 15–20 мин. Растворитель смесь 96% этанол : вода в соотношении 1 : 20, температура 25–65 °С	антоцианы 2.37–3.01 мг/мл экстракта	[85]

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
жмых клюквы	общие антоцианы, в т.ч. цианидин-3-галактозид, цианидин-3-арабинозид, пеонидин-3-галактозид, пеонидин-3-арабинозид, общие фенольные соединения	давление 50 бар, 60–120 °С с постоянным расходом 5 мл/мин, время 10 мин, растворитель 30–100% этанол	антоцианы 6.02–8.42 мг Су3GE CB фенолы 84.96±7.82 мг GAE CB	[87]
клюкwa	7 видов антоцианов, в т.ч. пеонидин-3-(6-малон)-глюкозид, пеларгонидин-3-(6-малон)-глюкозид	УЗЭ, мощность 310 Вт, время 33 мин, температура 53 °С, растворитель 52% этанол	7.25±0.02 мг/г	[89]
прессованные остатки америкaнской клюквы	антоцианы: цианидин-3-О-арабинозид, пеонидин-3-О-галактозид, пеонидин-3-О-глюкозид и пеонидин-3-О-арабинозид	УЗЭ, мощность 100 Вт и 360 Вт, температура 30 °С, растворители 96% этанол, 0.5% трифторуксусная кислота, соотношение растворитель : образец 100 : 1	общие антоцианы, мг/г CB 0.135±0.003 (100 Вт), 0.147±0.004 (360 Вт), цианидин-3-О-галактозид 1.73±0.17, цианидин-3-О-глюкозид 0.06±0.01, цианидин-3-О-арабинозид 3.07±0.31, пеонидин-3-О-галактозид 3.04±0.21, пеонидин-3-О-глюкозид 0.36±0.04, пеонидин-3-О-арабинозид 2.31±0.23	[91]

Сокращения: ТАС – общее содержание антоцианов, Су3-gal – цианидин-3-О-галактозид, ЦГ, Су3GE – цианидин-3-О-глюкозид, ТРС – общее содержание фенолов, GAE, ГК – эквивалент галловой кислоты, К – эквивалент кверцетина, TFC – общее содержание флавоноидов, СВ – сухое вещество (сухой образец)

Флавоноиды и антоцианы из луковой шелухи. Лук – один из основных ингредиентов, используемых в составе пищевых продуктов [3]. Переработку этого овоща сопровождает накопление большого объема отходов в виде луковой шелухи, что создает нагрузку на окружающую среду. Из-за серосодержащих соединений, которые придают луку характерный аромат, эти отходы не подходят для кормления животных или утилизации на свалках [3]. Рациональное использование луковой шелухи позволит производить продукцию с высокой добавленной стоимостью благодаря большому количеству флавоноидов и антоцианов [2]. В группу флавоноидов входит кверцетин и его производные, которые обладают полезными свойствами [1, 3, 21, 92–96]. Экстракты из луковой шелухи используют в технологии получения пищевых продуктов, например, выпечки, лапши или макарон, мясных изделий, красителей и осветлителей сока [2, 21, 97–99]. Сравнивая различные сорта, во внешних слоях красного лука регистрируют относительно высокое содержание антиоксидантов [23]. Основным пигментом кожуры красного лука является цианидин-3-глюкозид [3].

Состав экстракта луковой шелухи зависит от сорта, региона выращивания и агрономических условий, а также методов извлечения. Пигменты, полученные из луковых отходов, стабильны при хранении в широком диапазоне кислотности среды, а при значениях pH, превышающих 5 единиц, наблюдали усиление цвета экстракта [23]. Интенсивность окраски также зависит от присутствия циклодекстринов и температуры хранения [100]. Для извлечения веществ из вторичного сырья лука используют разные методы [3, 100]. УЗЭ также применили для извлечения соединений из шелухи лука, варьируя частоты и режим обработки [40, 101]. Этот метод экстракции в водный раствор 70% этилового спирта обеспечивает более эффективное извлечение веществ, чем традиционные методы [21, 92, 93]. Экстрагирующий состав на основе водного раствора глицерина также может быть использован для извлечения посредством ультразвука полифенолов и пигментов из твердых отходов лука [1]. Традиционная экстракция растворителем и УЗЭ обеспечивали сходные профили фенольных соединений. Отметим то, что богатый флавоноидами (21%) порошок, полученный в результате лиофилизации экстракта, сохранял 90% антиоксидантной активности после 180 дней хранения при температуре не выше 4 °С [98]. Способы и условия ультразвуковой экстракции флавоноидов и антоцианов лука представлены в таблице 2.

Таблица 2. Ультразвуковая экстракция флавоноидов лука

Растительное сырье	Экстрагируемое вещество (вещества)	Условия экстракции	Выход целевых веществ	Источник
Шелуха красного лука	общие фенолы, общий выход пигмента в эквиваленте цианидина-3-О-глюкозида (СуЕ) на г сухого образца	УЗЭ, мощность 140 Вт, частота 37 кГц, плотность акустической энергии 35 Вт/л, время 60 мин, температура 45 °С, растворитель глицерин 90% (по массе), соотношение растворитель : образец 90 мл/ г	фенолы 64.91 мг GAE/ г СВ, пигмент 1.86 мг СуЕ/ г СВ	[1]
Шелуха желтого лука	общие фенолы, общие антоцианы	УЗЭ ванна, мощность 150 кВт, температура 30, 40, 50 °С, время обработки 10, 20, 30 мин, растворитель 50, 75, 100% этанол, соотношение растворитель : образец 10 мл/г	ТРМ от 24.80 до 33.83 мг GAE/г, ТМА от 7.86 до 17.63 мг С3G/100 г образца	[40]
Шелуха красного лука	флавоноиды, антоцианы, фенолы	УЗЭ, мощность 150 Вт, частота 40 кГц, амплитуда 70%, импульсный режим 5 с УЗ – 5 с интервал – 5 с УЗ; температура 51–58 °С, время 15–25 мин, растворитель 70% этанол	флавоноиды Σ 147 мг QE/г СВ, антоцианы Σ 1160 мг Сун-3-OG/100 г СВ, фенолы Σ 9600 мг GAE/100 г СВ	[93]
Шелуха золотистого (коричневого) лука	кверцетин, кверцетин-4'-О-глюкозид, флавоноиды	УЗЭ, энергия 10 кДж/г СВ, амплитуда 40%, время обработки менее 5 мин, температура 37 °С, растворитель этанол 70%, соотношение растворитель : образец 30 мл/г	флавоноиды 23.9 \pm 0.2 мг QE/г СВ, производительность УЗЭ кверцетина и кверцетин-4'-О-глюкозида 11.6 мг QE/г СВ•мин	[98]
Шелуха лука	гликозиды флавоноидов, агликоны флавоноидов: протокатехиновая кислота; кверцетин-3,4'-диглюкозид; мирицетин; изорамнетин-3,4'-диглюкозид; феруловая кислота; ванильная кислота; кверцетин-4'-глюкозид; изорамнетин-4'-глюкозид; кверцетин; изомер кверцетина	УЗЭ ванна, мощность 550 Вт, плотность УЗ мощности 50 Вт/л, частота 25, 33, 45 кГц, температура 25 °С, время обработки 10 мин, растворитель 80% метанол, соотношение растворитель: образец 10 мл/г, после УЗ обработки перемешивание в течение 1 или 16 ч при 1600 об./мин.	при 45 кГц извлекаются гликозиды флавоноидов, при 25 кГц с длительным перемешиванием – агликоны	[101]

Сокращения: TFC – общее содержание флавоноидов, QE – эквивалент кверцетина, TAC, TAM – общее содержание антоцианов, СуЕ, С3G, Су3GE, Сун-3-OG – цианидин-3-О-глюкозид, TPC, ТРМ – общее содержание фенолов, GAE – эквивалент галловой кислоты, СВ – сухое вещество (сухой образец)

Каротиноиды. Каротиноиды – группа природных пигментов, содержащихся в растениях, грибах, водорослях, бактериях, которые играют значимую роль в пищевой промышленности. Благодаря высокому антиоксидантному потенциалу, эти пигменты относят к полезным для здоровья человека [11, 32]. Этот вид веществ в основном используются в качестве пищевых красителей при производстве сыров, напитков, молочных продуктов [61], изготовлении сливочного и растительных масел, заправок для салатов, мороженого, кондитерских изделий, мясных продуктов [32]. В результате наблюдается рост интереса к использованию натуральных каротиноидов [102] и развитие технологии их извлечения [24].

Каротиноиды подразделяют на два основных класса [32, 102]. В первый входят соединения, состоящие из углеводородной цепи без каких-либо функциональных групп, например, ликопин, бета-каротин. Второй класс объединяет ксантофиллы, молекулы которых содержат кислородсодержащую группу, например, лютеин и зеаксантин. В зависимости от наличия полярных групп различают гидрофобные и гидрофильные каротиноиды [102]. Каротиноиды природного происхождения окрашивают продукты в желтый, оранжевый и красный цвет [31]. Степенью сопряженности объясняют разную по оттенку окраску пигментов,

например, более крупным молекулам соответствуют самые красные оттенки. На цвет влияет степень циклизации, что объясняет, почему ликопин, β -каротин и γ -каротин при одинаковом количестве двойных связей имеют красный, оранжевый и красно-оранжевый цвета соответственно [61]. Благодаря химической структуре каротиноиды очень чувствительны к окислению и изомеризации, что следует учитывать при переработке и хранении пищевых продуктов [74, 103].

Для извлечения каротиноидов используют побочные продукты переработки моркови [104–106], граната [107], апельсина [108], мандарина [17], тыквы [32, 109], томатов [38, 110], семян аннато [35]. Каротиноиды получают экстрагированием из растительного сырья с применением органических растворителей [11, 32, 102]. Для экстракции неполярных каротиноидов используют гексан, хлороформ, петролейный эфир и тетрагидрофуран, для полярных – ацетон, этанол, этилацетат, бутилгидрокситолуол, изопропанол [32, 102]. Многие из перечисленных веществ опасны для человека и окружающей среды, так как токсичны, взрывоопасны, легко воспламеняются [102]. Альтернативой органическим растворителям служат растительные масла, эвтектические растворители, ионные жидкости или лимонен, отвечающие принципам «зеленой» химии [32, 108, 111]. Как правило, их применяют в сочетании с ультразвуковой, микроволновой и другими современными способами экстракции [108, 112]. Такая комбинация дает преимущества за счет упрощения удаления растворителя и очистки целевого продукта.

Ультразвуковая обработка – пример «зеленой» технологии экстракции каротиноидов [24]. Сравнительные исследования показали преимущество УЗЭ при выделении пигментов из отходов граната [107], яблока кешью [112] и томатной выжимки [24, 110]. Процесс УЗЭ общих каротиноидов из эпикарпа мандарина был оптимизирован, что позволило предложить эти экстракты взамен синтетического красителя тартразина [17]. Авторы данной публикации считают, что УЗЭ является наиболее эффективным методом для получения нестабильных фитосоединений. Обнаружено, что такой подход ускоряет процесс извлечения фитохимических веществ из семян аннато, увеличивает выход целевого продукта и снижает потребление энергии [35, 113]. Подтверждено положительное влияние УЗЭ на сохранность антиоксидантной активности и эффективность экстракции из тыквы, когда общее количество каротиноидов увеличилось почти вдвое [109]. Для улучшения качества пигмента, полученного из моркови, полезной оказалась предобработка исходного сырья ультразвуком [52, 114]. Некоторые режимы экстракции каротиноидов представлены в таблице 3.

Беталаины. Беталаины представляют группу растворимых в воде пигментов, которые определяют цвет плодов, например, красной свеклы, опунции, папайи, амаранта и других [24, 38]. Описано извлечение беталаинов из кожуры красного драконьего фрукта и колючей груши [18]. Структура беталаинов, как азотсодержащих гетероциклических соединений, в своей основе содержит ядро беталаминовой кислоты [24]. Эти пигменты образуют две основные группы: красно-фиолетовых бетацианинов и желто-оранжевых бетаксантинов [38], которые соединяются с моно- или дисахарами, образуя в результате ацилирования несколько видов бетацианидных гликозидов. Различные цветовые фенотипы овощей обусловлены соотношением в них содержания бетацианинов и бетаксантинов [24]. Беталаины стабильны в широком диапазоне pH (3–7), поэтому цвет этих пигментов практически не зависит от кислотности среды. Однако на их стабильность влияют такие факторы, как температура, свет и кислород [74, 115].

Фитохимические вещества свеклы обладают биологически активным потенциалом, способствуя снижению риска ряда заболеваний [116–121]. Показано, что добавки беталаина полезны при заболеваниях, связанных с дислипидемией, окислительным стрессом и воспалением [9, 122–125]. Беталаины применяются для окрашивания продуктов в красно-фиолетовые и желто-оранжевые цвета [126]. Они могут использоваться в низкокислотных продуктах питания, таких как молочные продукты (йогурт и мороженое), в сиропах, колбасах и кондитерских изделиях [61], а также в составе пищевой упаковки [127]. Одним из богатейших источников беталаинов служит красная свекла [128–130], где содержание пигментов варьирует в зависимости от вида, сорта или условий выращивания корнеплода [24]. Годовое мировое производство свеклы в 2018 году составило 274 млн тонн [126]. Около 70% мирового производства свеклы сосредоточено в Европе, а Россия входит в пятерку ведущих производителей [24, 126].

УЗЭ успешно применяют для экстракции беталаинов из побочных продуктов переработки, например, из стеблей красной свеклы [24, 131]. В цитируемой публикации показано, что максимальный выход вещества получен при повышении температуры до 55 °C, мощности ультразвука 100 Вт, времени экстракции 38 мин и соотношении твердой и жидкой фаз 1 : 25 соответственно. Похожие параметры получены для УЗЭ корнеплода [123] или листьев свеклы [132]. В последней работе при оптимальных условиях выход веществ

составил 562 мкг/г (бетацианины), 949 мкг/г (бетаксантины) и 15 мг/г (полифенолы). Показана перспективность применения полуфабрикатов свеклы для производства натуральных пищевых красителей [128]. В качестве источника сырья использовали высушенную цельную свеклу, а также влажный или высушенный жом свеклы притом, что для высушенных образцов характерна более высокая эффективность экстракции беталаинов и полифенолов. В течение хранения экстрактов при комнатной температуре беталаины деградировали, но содержание полифенолов и антиоксидантная активность меньше подвергались влиянию температуры. Эффективность бинарной смеси (этанол/вода) при извлечении бетанина изучали на примере алжирской свеклы [133]. Отмечено, что водный экстракт содержит бетанидин, а спиртовой – бетанин, где количество бетанина варьирует в зависимости от соотношения используемых растворителей. В другом исследовании оценили эффективность УЗЭ для извлечения беталаинов из кожуры красной свеклы [134]. Сравнивали только продолжительность двух интервалов экстракции (30 и 60 мин). Выход бетаксантинов при экстракции был выше при относительно короткой экспозиции, но временной интервал не влиял на извлечение бетацианинов. УЗЭ увеличила выход экстрактов в 4.5 раза для бетацианинов и в 2 раза для бетаксантинов. Аналогичная работа проведена для экстракции беталаинов из отходов, полученных в результате производства сока красной свеклы [24, 128]. Авторы выделили 30% водный раствор этанола как лучший растворитель для экстракции, который обеспечивал максимальное восстановление пигментов. Данные о режимах УЗ экстракции беталаинов приведены в таблице 4.

Таблица 3. Ультразвуковая экстракция каротиноидов

Растительный источник	Экстрагируемые вещества	Условия экстракции	Выход целевых веществ	Источник
1	2	3	4	5
Эпикарп мандарина	общие каротиноиды	УЗЭ, мощность 240 Вт, частота 42 кГц, время 60 мин, температура 60 °С, растворитель подсолнечное масло, соотношение образцов : растворитель 0.0004 г/мл	140.70±2.66 мг β-каротина/100 г СВ	[17]
Морковь	каротиноиды	Предобработка (для дальнейшей сушки) моркови, смоченной в дистиллированной воде, в вакуумных пакетах в УЗ ванне: частота 21 и 35 кГц, время 10, 20 и 30 мин, температура 25 °С	увеличение содержания каротиноидов в высушенном материале, обработанном УЗ при частоте 21 кГц в течение 10 и 20 мин, на 22 и 44%, соответственно, по сравнению со свежим материалом	[52]
Жмых моркови	β-каротин, фенольные соединения	Электрогидродинамическая (ЕНД) предобработка (напряжение 20 кВ, время 20 мин) и УЗЭ, мощность 500 Вт, частота 20 кГц, время 80 мин, температура 30 °С, растворитель 96% этанол, соотношение образцов : растворитель 10 : 100 г/мл	β-каротин 415.28±0.56 мг/л; 433.42±1.86 мг/л, общее содержание фенольных соединений 151.48±76 мг/л; 155.42±7.73 мг/л; выход экстракции 9.15±0.25; 9.70±0.10%	[104]
Жмых моркови	общие каротиноиды, β-каротин, лютеин, ликопин	– экстракция общих каротиноидов: УЗЭ, время 17 мин, температура 32 °С, растворитель 51% этанол; – экстракция комбинации β-каротина, лютеина и ликопина: УЗЭ, время 16 мин, температура 29 °С, растворитель 59% этанол	общее количество каротиноидов 31.82±0.55 мкг/г, β-каротин 14.89±0.40 мкг/г, лютеин 5.77±0.19 мкг/г, ликопин 2.65±0.12 мкг/г	[105]
Жмых моркови	каротиноиды	УЗЭ, мощность 350 Вт, температура 50 °С, время 12.5 мин, растворитель олеиновая кислота, соотношение растворитель : образец 39 мл/г	163.43±1.83 мкг/г	[106]
Кожура граната	каротиноиды	УЗЭ погружной зонд, мощность 130 Вт, частота 20 кГц, амплитуда 58.8%; импульсный режим, время 30 мин, температура 51.5 °С; растворитель подсолнечное масло, соотношение образцов : растворитель 1 : 10	0.3255 мг/100 г СВ	[107]
Цедра апельсина	каротиноиды	экстракция ионной жидкостью 1-бутил-3-метилимидазолия хлорид ([BMIM] [Cl])	32.08±2.05 мкг/г	[108]

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5
Мякоть и кожура тыквы	общие каротиноиды, общие фенолы	погружной УЗ зонд, амплитуда 20%, импульсный режим, время 30 мин, температура 22–25 °С, растворитель кукурузное масло, соотношение образец : растворитель 1 : 10	каротиноиды: мякоть 28.01–32.69 мкг/г экстракта, кожура 33.78–38.03 мкг/г экстракта; фенолы: мякоть 524.48–555.2 мг GAE/г экстракта, кожура 547.94–588.68 мг GAE/г экстракта	[109]
Томатные отходы	ликопин	комбинированная обработка сублимационной сушкой при -40 °С и УЗ (частота 50 Гц, время обработки 45 мин, температура комнатная), растворитель смесь гексан : ацетон : метанол : толуол 10 : 7 : 6 : 7 по объему/объему; соотношение растворитель : образец 10 г : 30 мл	ликопин: УЗЭ: 45.51±1.84 мкг/г свежей массы, УЗЭ + сублимационная сушка: 138.82±6.64 мкг/г свежей массы	[110]
Яблоко кешью	β-каротин	УЗ ванна, мощность 80 Вт, частота 40 кГц, время 19 мин, растворитель смесь 44% ацетон : 56% метанол	144.67–165.47 мкг/г	[112]
Семена аннато	биксин, полифенолы: катехин, хлорогеновая кислота, хризин, бугтеин, гиполаэтин, ликохалкон А, ксантогумол	УЗЭ, мощность 320 Вт, частота 37 кГц, время 20 мин, растворитель абсолютный этанол, pH 7.0, соотношение образец : растворитель 1 : 7	0.62% биксина, 3.81 мг GA/г семян	[113]
Морковь	общие каротиноиды	УЗЭ ванна, мощность 180 или 300 Вт, частота 21 или 40 кГц, время 60 или 180 с, температура окружающей среды, растворитель 96% этанол, соотношение образец : растворитель 1 : 2	повышение ТСС в моркови после УЗ в этаноле по сравнению с исходным материалом (53.60±4.78 мг/100 г СВ): – 60 с при частоте 21 кГц – на 32%, при частоте 40 кГц – на 44%; – 180 с при частоте 21 кГц – на 104%, при частоте 40 кГц – на 144%	[114]

Сокращения: ТСС – общее содержание каротиноидов, мг/100 г СВ; GA – галловая кислота, СВ – сухое вещество (сухой образец).

Таблица 4. Способы экстракции беталаинов свеклы

Растительное сырье	Экстрагируемые вещества	Условия обработки	Выход целевых веществ	Источник
1	2	3	4	5
Сушеная цельная свекла, сушеный свекловичный жом	беталаины, полифенолы	УЗ ванна, мощность 35 Вт, частота 44 кГц, время 30 мин, температура 30 °С, растворитель смесь этанол : вода 30%	беталаины до 3 мг/г, соотношение бетацианина к бетаксантину 1–1.35	[128]
Кожура свеклы	беталаины, полифенолы	экстракция растворителем: смесь лимонная кислота 1.5% : этанол 50%, температура 52.52 °С, время 49.9 мин	беталаины 1.2 мг/г сухой массы, полифенолы 2.39 мг/г сухой массы	[129]
Кожура свеклы	беталаины, бетацианин, бетаксантин	микроволновая экстракция, мощность 800 Вт, время 150 с, температура 30–70 °С, растворитель вода	общее количество беталаинов 202.08±2.23 мг/100 г сырой массы, бетацианин 115.89±1.08 мг/100 г сырой массы; бетаксантин 86.21±1.16 мг/100 г сырой массы	[130]

Окончание таблицы 4

1	2	3	4	5
Стебли красной свеклы	бетацианин, бетаксантин	УЗ погружной зонд, мощность 89 Вт, время 35 мин, температура 53 °С, растворитель вода, соотношение образец : вода 1 г : 19 мл	бетацианин 1.28±0.02 мг/г, бетаксантин 5.31±0.09 мг/г	[131]
Листья свеклы	беталаины, полифенолы	УЗ погружной зонд, мощность 90 Вт, частота 20 кГц, время 16 мин, растворитель вода, соотношение образец : растворитель 1 : 20	полифенолы 14.9 мг/г, бетаксантины 949.1 мкг/ г, бетацианины 562.2 мкг/ г	[132]
Алжирская красная свекла	бетанин	растворитель : смесь этанол 20% : вода 80%, температура 25 °С	бетанин $3.42 \cdot 10^{-4}$ г/мл	[134]
Кожура красной свеклы	общие беталаины, в т.ч. бетацианины и бетаксантины, общие фенолы	УЗ ванна, мощность 200 Вт, частота 37 кГц, время 30 и 60 мин, растворитель дистиллированная вода, соотношение образец : растворитель 1 : 20 мас./об.	общие фенолы 44–47 мг ГК/г СВ, бетацианины 3.84–3.87 мг бетанина/г СВ, бетаксантины 6.98–8.61 мг вулгаксантина /г СВ	[134]

Заключение

Традиционным сырьем для выделения пигментов служат ягоды, плоды овощей и фруктов, корнеплоды. Экономически выгодным источником природных пигментов для отечественной пищевой промышленности являются доступные и относительно недорогие побочные продукты переработки растительного сырья – отходы переработки клюквы, черники и других ягод, репчатого лука, моркови, свеклы. В этом направлении проводятся исследования с целью разработки оптимальных методов извлечения целевых веществ из вторичных растительных ресурсов.

В рассмотренных исследованиях источниками антоциановых пигментов служили ягоды или ягодные смеси, жмых, оставшийся после отделения сока, кожура граната и плодов цитрусовых. Для извлечения целевых веществ в качестве растворителей применяли главным образом 30–100% этанол, смесь этанола с трифторуксусной кислотой. К перспективным и экологичным экстрагентам относится глубокий эвтектический растворитель, например, NADES (хлорид холина – щавелевая кислота, ChOa), использованный для УЗЭ антоцианов из жмыха черники. Мощность УЗЭ обработки варьирует в нескольких наиболее часто встречающихся интервалах значений: 64–80, 100–180, 310–325 Вт, в единственном из исследованных источников указана обработка мощностью 600 Вт для оттаивания ягод черники, предварительно замороженных в жидком азоте. Частота ультразвука в основном составляет от 20 до 64 кГц. Разброс температуры – в пределах 25–76 °С, продолжительность обработки зависит от остальных условий, изменяется в интервале 3.2–15, 20–60 мин.

Переработка лука является быстрорастущим и высокоотходным производством, вследствие чего объемы луковой шелухи накапливаются с высокой интенсивностью. Шелуха лука богата флавоноидами и другими ценными фитохимическими веществами, поэтому актуален поиск эффективных способов ее рационального использования. УЗЭ луковой шелухи проводили с применением, главным образом, 70% этанола, а также 90% глицерина при мощности обработки 100–150 Вт, частоте 25–45 кГц, температуре 37–58 °С, в течение 15–25 мин.

К основным источникам каротиноидов относятся морковь и морковный жмых, кожура тыквы, апельсина, мандарина, томатов. УЗ экстракцию жирорастворимых каротиноидов ведут в среде подсолнечного или кукурузного масла, олеиновой кислоты, но также этанола или смеси полярных (метанол, ацетон) и неполярных растворителей (гексан, толуол). В качестве зеленых растворителей рассматриваются ионные жидкости, такие как 1-бутил-3-метилимидазолия хлорид. Значения мощности обработки находятся в интервалах 80–130 Вт или 240–500 Вт, частоты – 20–42 кГц, в случае комбинированной обработки УЗЭ и сублимационной сушки при –40 °С использовали частоту 50 Гц. Процесс, как правило, ведут при комнатной температуре или при нагревании не выше 60 °С. Минимальная продолжительность обработки составляла 12.5 мин, максимальная – 80 мин.

Для извлечения беталаинов использовали как цельную свеклу, так и продукты ее переработки – кожуру, листья и стебли. В качестве растворителей применяли воду, смеси этанола с водой или раствором лимонной кислоты. Режимы обработки предусматривали мощность УЗ в интервале 35–800 Вт, частоту 20–44 кГц, процесс вели при температуре 30–70 °С в течение 2.5–60 мин.

Метод УЗЭ занимает устойчивую позицию среди наиболее перспективных методов экстракции пигментов из растительного сырья. Этот подход, наряду с высоким выходом экстрагируемых веществ, снижает потребление энергии и технологических ресурсов. Комбинирование УЗЭ с «зелеными» растворителями для извлечения пигментов рассматривают в качестве экологически чистого способа более полной утилизации отходов переработки фруктов и овощей.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-16-00019, <https://rscf.ru/project/20-16-00019>. В части развития методов функциональной микроскопии биоструктур исследование поддержано Государственным заданием № 075-00223-25-00.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Katsampa P., Valsamedou E., Grigorakis S., Makris D.P. A green ultrasound-assisted extraction process for the recovery of antioxidant polyphenols and pigments from onion solid wastes using Box–Behnken experimental design and kinetics // *Industrial Crops and Products*. 2015. Vol. 77, no. 23. Pp. 535–543. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.039>.
2. Chadorshabi S., Hallaj-Nezhadi S., Ghasempour Z. Red onion skin active ingredients, extraction and biological properties for functional food applications // *Food Chemistry*. 2022. Vol. 386. Article 132737. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132737>.
3. Celano R., Docimo T., Piccinelli A.L., Gaggero P., Tucci M., Di Sanzo R., Carabetta S., Campone L., Russo M., Rastrelli L. Onion Peel: Turning a Food Waste into a Resource // *Antioxidants*. 2021. Vol. 10. 304. <https://doi.org/10.3390/antiox10020304>.
4. Carpentieri S., Soltanipour F., Ferrari G., Pataro G., Donsi F. Emerging green techniques for the extraction of antioxidants from agri-food by-products as promising ingredients for the food industry // *Antioxidants*. 2021. Vol. 10. 1417. <https://doi.org/10.3390/antiox10091417>.
5. Wani F.A., Rashid R., Jabeen A., Brochier B., Yadav S., Aijaz T., Makroo H.A., Dar B.N. Valorisation of food wastes to produce natural pigments using non-thermal novel extraction methods: a review // *International Journal of Food Science & Technol.* 2021. Vol. 56. 4823. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15267>.
6. Waseem M., Majeed Y., Nadeem T., Naqvi L.H., Khalid M.A., Sajjad M.M., Sultan M., Khan M., Khayrullin M., Shariati M.A., Lorenzo J.M. Conventional and advanced extraction methods of some bioactive compounds with health benefits of food and plant waste: A comprehensive review // *Food Frontiers*. 2023. Pp. 1–21. <https://doi.org/10.1002/fft2.296>.
7. Diaconeasa Z., Iuhas C.I., Ayvaz H., Mortas M., Farcaş A., Mihai M., Danciu C., Stanilă A. Anthocyanins from Agro-Industrial Food Waste: Geographical Approach and Methods of Recovery – A Review // *Plants*. 2023. Vol. 12. P. 74. <https://doi.org/10.3390/plants12010074>.
8. Younas A., Kiran S., Abrar S., Javed S., Gulzar T. Ultrasonic-Assisted Extraction and Characterization of Natural Colorants from Plants and Evaluation of Their Therapeutic Properties and Cytotoxicity // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2022. Vol. 31, no. 6. Pp. 5945–5954. <https://doi.org/10.15244/pjoes/151862>.
9. Benucci I., Lombardelli C., Mazzocchi C., Esti M. Natural colorants from vegetable food waste: Recovery, regulatory aspects, and stability – A review // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022. Vol. 21. Pp. 2715–2737. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12951>.
10. Taban B.M., Stavropoulou E., Winkelströter L., Bezirtzoglou E. Value-added effects of using aromatic plants in foods and human therapy // *Food Science and Technology*. 2022. Vol. 42. Article 43121. <https://doi.org/10.1590/fst.43121>.
11. Mir S.A., Rizwan D., Bakshi R.A., Wani S.M., Masoodi F.A. Extraction of carotenoids from agro-industrial waste // *Extraction of Natural Products from Agro-Industrial Wastes. A Green and Sustainable Approach*. Amsterdam, Netherlands, 2023. Pp. 157–178. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823349-8.00016-2>.
12. Mir-Cerda A., Nunez O., Granados M., Sentellas S., Saurina J. An overview of the extraction and characterization of bioactive phenolic compounds from agri-food waste within the framework of circular bioeconomy // *Trends in Analytical Chemistry*. 2023. Vol. 161. Article 116994. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116994>.

13. Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.G., Meullemiestre A., Fabiano-Tixier A.S., Abert-Vian M. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017. Vol. 34. Pp. 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>.
14. García S.L.R., Raghavan V. Green extraction techniques from fruit and vegetable waste to obtain bioactive compounds – A review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021. Vol. 62, no. 23. Pp. 6446–6466. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1901651>.
15. Rifna E.J., Misra N.N., Dwivedi M. Recent advances in extraction technologies for recovery of bioactive compounds derived from fruit and vegetable waste peels: A review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. Vol. 63, no. 6. Pp. 719–752. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1952923>.
16. Gardana C., Scialpi A., Fachechi C., Simonetti P. Identification of markers for the authentication of cranberry extract and cranberry-based food supplements // *Heliyon*. 2020. Vol. 6, no. 4. Article 03863. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03863>.
17. Ordóñez-Santos L.E., Esparza-Estrada J., Vanegas-Mahecha P. Ultrasound-assisted extraction of total carotenoids from mandarin epicarp and application as natural colorant in bakery products // *LWT – Food Science and Technology*. 2021. Vol. 139. Article 110598. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110598>.
18. Sharma M., Usmani Z., Gupta V.K., Bhat R. Valorization of fruits and vegetable wastes and by-products to produce natural pigments // *Critical Reviews in Biotechnology*. 2021. Vol. 41, no. 4. Pp. 535–563. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1873240>.
19. Chernukha I., Fedulova L., Vasilevskaya E., Kulikovskii A., Kupaeva N., Kotenkova E. Antioxidant effect of ethanolic onion (*Allium cepa*) husk extract in ageing rats // *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2021. Vol. 28, no. 5. Pp. 2877–2885. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.02.020>.
20. Fidelis M., de Moura C., Kabbas J.T., Pap N., Mattila P., Mäkinen S., Putnik P., Bursać Kovačević D., Tian Y., Yang B., Granato D. Fruit seeds as sources of bioactive compounds: sustainable production of high value-added ingredients from by-products within circular economy // *Molecules*. 2019. Vol. 24, no. 21. Article 3854. <https://doi.org/10.3390/molecules24213854>.
21. Kumar M., Barbhai M.D., Hasan M., Dhumal S., Singh S., Pandiselvam R., Rais N., Natta S., Senapathy M., Sinha N., Amarowicz R. Onion (*Allium cepa* L.) peel: A review on the extraction of bioactive compounds, its antioxidant potential, and its application as a functional food ingredient // *Journal of Food Science*. 2022. Vol. 87. Pp. 4289–4311. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16297>.
22. More P.R., Arya S.S. A novel, green cloud point extraction and separation of phenols and flavonoids from pomegranate peel: An optimization study using RCCD // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019. Vol. 7, no. 5. Article 103306. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103306>.
23. Prodromidis P., Mourtzinis I., Biliaderis C.G., Moschakis T. Stability of natural food colorants derived from onion leaf wastes // *Food Chemistry*. 2022. Vol. 386, no. 30. Article 132750. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132750>.
24. Carrillo C., Nieto G., Martínez-Zamora L., Ros G., Kamiloglu S., Munekata P.E.S., Pateiro M., Lorenzo J.M., Fernández-López J., Viuda-Martos M., Pérez-Álvarez J.A., Barba F.J. Novel Approaches for the Recovery of Natural Pigments with Potential Health Effects // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022. Vol. 70, no. 23. Pp. 6864–6883. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07208>.
25. Filipčev B. Chapter 16 – The effects of aromatic plants and their extracts in food products // *Feed additives*. London, 2020. Pp. 279–294. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814700-9.00016-9>.
26. Lianza M., Marincich L., Antognoni F. The Greening of Anthocyanins: Eco-Friendly Techniques for Their Recovery from Agri-Food By-Products // *Antioxidants*. 2022. Vol. 11. Article 2169. <https://doi.org/10.3390/antiox11112169>.
27. Sanna D., Fadda A. Waste from Food and Agro-Food Industries as Pigment Sources: Recovery Techniques, Stability and Food Applications // *Nutraceuticals*. 2022. Vol. 2, no. 4. Pp. 365–383. <https://doi.org/10.3390/nutraceuticals2040028>.
28. Kumar G., Upadhyay S., Yadav D.K., Malakar S., Dhurve P., Suri S. Application of ultrasound technology for extraction of color pigments from plant sources and their potential bio-functional properties: A review // *Journal of food process engineering*. 2023. Vol. 46, no. 6. Article 14238. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14238>.
29. Hu Y., Yan B., Chen Z.S., Wang L., Tang W., Huang C. Recent Technologies for the Extraction and Separation of Polyphenols in Different Plants: A Review // *Journal of Renewable Materials*. 2022. Vol. 10, no. 6. Pp. 1471–1490. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.018811>.
30. Rodríguez-Mena A., Ochoa-Martínez L.A., González-Herrera S.M., Rutiaga-Quñones O.M., González-Laredo R.F., Olmedilla-Alonso B. Natural pigments of plant origin: Classification, extraction and application in foods // *Food Chemistry*. 2023. Vol. 398. Article 133908. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133908>.
31. Панасюк А.Л., Кузьмина Е.И., Егорова О.С. Производство и применение натуральных антоциановых пищевых красителей (обзор) // *Пищевая промышленность*. 2021. №10. С. 13–19. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.10.10.017>.
32. Linares G., Rojas M.L. Ultrasound-Assisted Extraction of Natural Pigments From Food Processing By-Products: A Review // *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. Article 891462. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.891462>.
33. Gil-Martín E., Forbes-Hernandez T., Romero A., Cianciosi D., Giampieri F., Battino M. Influence of the extraction method on the recovery of bioactive phenolic compounds from food industry by-products // *Food Chemistry*. 2022. Vol. 378. Article 131918. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131918>.

34. Rodríguez De Luna S.L., Ramírez-Garza R.E., Saldívar S.O. Environmentally friendly methods for flavonoid extraction from plant material: Impact of their operating conditions on yield and antioxidant properties // *The Scientific World Journal*. 2020. Vol. 2020. Article 6792069. <https://doi.org/10.1155/2020/6792069>.
35. Bitwell C., Indra S.S., Lukec C., Kakoma M.K. A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants // *Scientific African*. 2023. Vol. 19. Article 01585. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01585>.
36. Chaves J.O., de Souza M.C., da Silva L.C., Lachos-Perez D., Torres-Mayanga P.C., Machado A.P.F., Forster-Carneiro T., Vázquez-Espinosa M., González-de-Peredo A.V., Barbero G.F., Rostagno M.A. Extraction of Flavonoids From Natural Sources Using Modern Techniques // *Frontiers in Chemistry*. 2020. Vol. 8. Article 507887. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.507887>.
37. Soquetta M.B., De Marsillac Terra L., Bastos C.P. Green technologies for the extraction of bioactive compounds in fruits and vegetables // *CyTA – Journal of Food*. 2018. Vol. 16, no. 1. Pp. 400–412. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.141197>.
38. Lombardelli C., Benucci I., Mazzocchi C., Esti M. Green Enzymatic Recovery of Functional Bioactive Compounds from Unsold Vegetables: Storability and Potential Health Benefits // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 23. Article 12249. <https://doi.org/10.3390/app122312249>.
39. Nishad J., Saha S., Kaur C. Enzyme- and ultrasound-assisted extractions of polyphenols from *Citrus sinensis* (cv. Malta) peel: A comparative study // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2019. Vol. 43, no. 4. Pp. 14046.1–14046.13. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14046>.
40. Güldane M., Cingöz A. Extraction of Bioactive Compounds from Yellow Onion Peels: Taguchi-SAW Hybrid Optimization // *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technolog.* 2023. Vol. 11(s1). Pp. 2589–2594. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v11is1.2589-2594.6513>.
41. Lončarić A., Celeiro M., Jozinović A., Jelinić J., Kovač T., Jokić S., Babić J., Moslavac T., Zavadlav S., Lores M. Green extraction methods for extraction of polyphenolic compounds from blueberry pomace // *Foods*. 2020. Vol. 9, no. 11. Article 1521. <https://doi.org/10.3390/foods9111521>.
42. Grassino A.N., Ostoji J., Mileti V., Djakovi S., Bosiljkov T., Zorić Z., Ježek D., Rimac S., Brncic M. Application of high hydrostatic pressure and ultrasound-assisted extractions as a novel approach for pectin and polyphenols recovery from tomato peel waste-sciencedirect // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. Vol. 64. Article 102424. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102424>.
43. Jha A.K., Sit N. Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods: A review // *Trends in Food Science. Technology*. 2022. Vol. 119. Pp. 579–591. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.019>.
44. Yusoff I.M., Taher Z.M., Rahmat Z., Chua L.S. A review of ultrasound-assisted extraction for plant bioactive compounds: Phenolics, flavonoids, thymols, saponins and proteins // *Food Research International*. 2022. Vol. 157. Article 111268. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111268>.
45. Сёмушкин Д.Н., Зиганшин Б.У., Сёмушкин Н.И., Дмитриев А.В., Максимов И.И., Казаков Ю.Ф. Методы интенсификации процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья // *Вестник Курганской ГСХА*. 2023. №1 (45). С. 78–88.
46. Das P., Nayak P.K., Kesavan R.K. Ultrasound assisted extraction of food colorants: Principle, mechanism, extraction technique and applications: A review on recent progress // *Food Chemistry Advances*. 2022. Vol. 1. Article 100144. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100144>.
47. Zabot G.L., Viganó J., Silva E.K. Low-Frequency Ultrasound Coupled with High-Pressure Technologies: Impact of Hybridized Techniques on the Recovery of Phytochemical Compounds // *Molecules*. 2021. Vol. 26. Article 5117. <https://doi.org/10.3390/molecules26175117>.
48. Lavilla I., Bendicho C. Fundamentals of Ultrasound-Assisted Extraction // *Water Extraction of Bioactive Compounds*. Amsterdam: Elsevier, 2017. Pp. 291–316. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809380-1.00011-5>.
49. Елапов А.А., Кузнецов Н.Н., Марахова А.И. Применение ультразвука в экстракции биологически активных соединений из растительного сырья, применяемого или перспективного для применения в медицине // *Разработка и регистрация лекарственных средств*. 2021. Т. 10, №4. С. 96–116. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-4-96-116>.
50. Tena N., Asuero A.G. Up-To-Date Analysis of the Extraction Methods for Anthocyanins: Principles of the Techniques, Optimization, Technical Progress, and Industrial Application // *Antioxidants*. 2022. Vol. 11, no. 2. Article 286. <https://doi.org/10.3390/antiox11020286>.
51. Tang J., Zhu X., Jambrak A.R., Sun D.W., Tiwari B.K. Mechanistic and synergistic aspects of ultrasonics and hydrodynamic cavitation for food processing // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. Vol. 17. Pp. 1–22. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2201834>.
52. Nowacka M., Wedzik M. Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue // *Applied Acoustics*. 2016. Vol. 103. Pp. 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.06.011>.
53. Belwal T., Huang H., Li L., Duan Z., Zhang X., Aalim H., Luo Z. Optimization model for ultrasonic-assisted and scale-up extraction of anthocyanins from *Pyrus communis* ‘Starkrimson’ fruit peel // *Food Chemistry*. 2019. Vol. 297. Article 124993. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124993>.
54. Morata A., Escott C., Loira I., López C., Palomero F., González C. Emerging Non-Thermal Technologies for the Extraction of Grape Anthocyanins // *Antioxidants*. 2021. Vol. 10. Article 1863. <https://doi.org/10.3390/antiox10121863>.

55. Жумагалиева Ш.Н., Аманжолқызы А., Султанова Н.А., Абилов Ж.А. Ультразвуковое экстрагирование биологически активных веществ *Tamarix hispida* Willd. // Химия растительного сырья. 2021. №3. С. 283–289. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021038695>.
56. Kumara K., Srivastava S., Sharanagat V.S. Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 70. Article 105325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325>.
57. Manzoor M., Singh J., Gani A., Noor N. Valorization of natural colors as health-promoting bioactive compounds: Phytochemical profile, extraction techniques, and pharmacological perspectives // Food Chemistry. 2021. Vol. 362, no. 11. Article 130141. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130141>.
58. Mesquita L.M.S., Martins M., Pisani L.P., Ventura S.P., Rosso V.V. Insights on the use of alternative solvents and technologies to recover bio-based food pigments // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2021. Vol. 20, no. 1. Pp. 787–818. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12685>.
59. Yuan J., Li H., Tao W., Han Q., Dong H., Zhang J., Jing Y., Wang Y., Xiong Q., Xu T. An effective method for extracting anthocyanins from blueberry based on freeze-ultrasonic thawing technology // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 68. Article 105192. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105192>.
60. Miranda P.H.S., Santos A.C., Freitas B.C.B., Souza Martins G.A., Vilas Boas E.V.D.B., Damiani C. A scientific approach to extraction methods and stability of pigments from Amazonian fruits // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 113. Pp. 335–345. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.047>.
61. Sigurdson G.T., Tang P., Giusti M.M. Natural Colorants: Food Colorants from Natural Sources // Annual Review of Food Science and Technology. 2017. Vol. 8, no. 1. Pp. 261–280. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-025923>.
62. Sabino L.B.S., Alves Filho A.E.G., Fernandes F.A.N., Brito E.S., Silva Júnior I.J. Optimization of pressurized liquid extraction and ultrasound methods for recovery of anthocyanins present in jambolan fruit (*Syzygium cumini* L.) // Food and Bioprocess Processing. 2021. Vol. 127. Pp. 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.02.012>.
63. Machado A.P.F., Sumere B.R., Mekaru C., Martinez J., Bezerra R.M.N., Rostagno M.A. Extraction of polyphenols and antioxidants from pomegranate peel using ultrasound: influence of temperature, frequency and operation mode // International Journal of Food Science & Technology. 2019. Vol. 54. Pp. 2792–2801. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14194>.
64. Nunes A.N., Borges A., Matias A.A., Bronze M.R., Oliveira J. Alternative Extraction and Downstream Purification Processes for Anthocyanins // Molecules. 2022. Vol. 27, no. 2. Article 368. <https://doi.org/10.3390/molecules27020368>.
65. Tan J., Han Y., Han B., Qi X., Cai X., Ge S., Xue H. Extraction and purification of anthocyanins: A review // Journal of Agriculture and Food Research. 2022. Vol. 8. Article 100306. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100306>.
66. Muhammad D.R.A., Wikandari R. Chapter 1 Extraction and stability assessment of the bioactive compounds from berries // Berry Bioactive Compound By-Products. Academic Press, 2023. Pp. 1–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95600-0.00007-9>.
67. Zeng Y., Zhou W., Yu J., Zhao L., Wang K., Hu Z., Liu X. By-Products of Fruit and Vegetables: Antioxidant Properties of Extractable and Non-Extractable Phenolic Compounds // Antioxidants. 2023. Vol. 12. Article 418. <https://doi.org/10.3390/antiox12020418>.
68. Gordillo B., Sigurdson G.T., Lao F., González-Miret M.L., Heredia F.J., Giusti M. Assessment of the color modulation and stability of naturally copigmented anthocyanin-grape colorants with different levels of purification // Food Research International. 2018. Vol. 106. Pp. 791–799. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.057>.
69. Zhao Y., Tran K., Brennan M., Brennan C. Kinetics of ultrasonic extraction of polyphenols, anthocyanins and tannins from five different New Zealand grape pomaces // International Journal of Food Science & Technology. 2021. Vol. 56, no. 6. Pp. 2687–2695. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14898>.
70. Ramesh M., Muthuraman A. Flavoring and Coloring Agents: Health Risks and Potential Problems // Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes. Handbook of Food Bioengineering. 2018. Pp. 1–28. DOI: 10.1016/b978-0-12-811518-3.00001-6.
71. Nistor M., Pop R., Daescu A., Pinte A., Socaciu C., Rugina D. Anthocyanins as Key Phytochemicals Acting for the Prevention of Metabolic Diseases: An Overview // Molecules. 2022. Vol. 27. Article 4254. <https://doi.org/10.3390/molecules27134254>.
72. Wu H., Oliveira G., Lila M.A. Protein-binding approaches for improving bioaccessibility and bioavailability of anthocyanins // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2023. Vol. 22. Pp. 333–354. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13070>.
73. Zang Z., Tang S., Li Z., Chou S., Shu C., Chen Y., Chen W., Yang S., Yang Y., Tian J., Li B. An updated review on the stability of anthocyanins regarding the interaction with food proteins and polysaccharides // Comprehensive reviews in food science and food safety. 2022. Vol. 21, no. 5. Pp. 4378–4401. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13026>.
74. Rocha F., Rezende J.P., dos Santos Dias M.M., Arruda P.V.R., Stringheta P.C., dos Santos Pires A.C., Teixeira Ribeiro Vidigal M.C. Complexation of anthocyanins, betalains and carotenoids with biopolymers: An approach to complexation techniques and evaluation of binding parameters // Food Research International. 2023. Vol. 163. Article 112277. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112277>.
75. Farooq S., Shah M.A., Siddiqui M.W., Dar B.N., Mir S.A., Ali A. Recent trends in extraction techniques of anthocyanins from plant materials // Journal of Food Measurement and Characterization. 2020. Vol. 14. Pp. 3508–3519. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00598-8>.

76. Alrugaibah M., Yagiz Y., Gu L. Use natural deep eutectic solvents as efficient green reagents to extract procyanidins and anthocyanins from cranberry pomace and predictive modeling by RSM and artificial neural networking // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 255. Article 17720. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117720>.
77. Constantin O.E., Istrati D.I. Extraction, Quantification and Characterization Techniques for Anthocyanin Compounds in Various Food Matrices – A Review // Horticulturae. 2022. Vol. 8. Article 1084. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111084>.
78. Guo Y., Zhang H., Shao S., Sun S., Yang D., Lv S. Anthocyanin: a review of plant sources, extraction, stability, content determination and modifications // International Journal of Food Science & Technology. 2022. Vol. 57, no. 12. Pp. 7573–7591. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16132>.
79. Liao J., Xue H., Li J., Peng L. Effects of ultrasound frequency and process variables of modified ultrasound-assisted extraction on the extraction of anthocyanin from strawberry fruit // Food Science and Technology. 2022. Vol. 42. Article 20922. <https://doi.org/10.1590/fst.20922>.
80. Макарова Н.В., Еремеева Н.Б. Сравнительное изучение влияния ультразвуковых воздействий на экстракцию антиоксидантных соединений ягод черники (*Vaccinium myrtillus* L.) // Химия растительного сырья. 2020. №1. С. 167–177. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020014425>.
81. Bamba B.S.B., Shi J., Tranchant C.C., Xue S.J., Forney C.F., Lim L-T. Influence of Extraction Conditions on Ultrasound-Assisted Recovery of Bioactive Phenolics from Blueberry Pomace and Their Antioxidant Activity // Molecules. 2018. Vol. 23. Article 1685. <https://doi.org/10.3390/molecules23071685>.
82. Colletti A., Sangiorgio L., Martelli A., Testai L., Cicero A.F.G., Cravotto G. Highly Active Cranberry's Polyphenolic Fraction: New Advances in Processing and Clinical Applications // Nutrients. 2021. Vol. 13. Article 2546. <https://doi.org/10.3390/nu13082546>.
83. 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. Vol. 49. Article 101918. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101918>.
84. Fu X., Wang D., Belwal T., Xie J., Xu Y., Li L., Zou L., Zhang L., Luo Z. Natural Deep Eutectic Solvent Enhanced Pulse Ultrasonication Assisted Extraction as a Multi-Stability Protective and Efficient Green Strategy to Extract Anthocyanin from Blueberry Pomace // LWT – Food Science and Technology. 2021. Vol. 144. Article 111220. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111220>.
85. Chesnokova N.Y., Levochkina L.V., Prikhod'ko Y.V., Kuznetsova A.A., Chebukin P.A. Influence of ultrasound and extraction conditions on the intensity of extraction of anthocyanin pigment from berry raw materials // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 848. Article 012211. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012211>.
86. Алексеенко Е.В., Бакуменко О.Е., Азарова М.М., Исабаев И.Б. Влияние предварительной обработки ягод клюквы на экстракцию антоциановых пигментов, выход сока и его антиоксидантную активность // Хранение и переработка сельхозсырья. 2019. №4. С. 10–23. <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.200>.
87. Saldaña M.D.A., Martinez E.R., Sekhon J.K., Vo H. The effect of different pressurized fluids on the extraction of anthocyanins and total phenolics from cranberry pomace // The Journal of Supercritical Fluids. 2021. Vol. 175. Article 105279. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105279>.
88. Xue H., Tan J., Li Q., Cai X. Optimization ultrasound-assisted extraction of anthocyanins from cranberry using response surface methodology coupled with genetic algorithm and identification anthocyanins with HPLC-MS² // Journal of Food Processing and Preservation. 2021. Vol. 45, no. 7. Article 15378. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15378>.
89. Xue H., Tan J., Fan L., Li Q., Cai X. Optimization microwave-assisted extraction of anthocyanins from cranberry using response surface methodology coupled with genetic algorithm and kinetics model analysis // Journal of Food Process Engineering. 2021. Vol. 44. Article 13688. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13688>.
90. Nemzer B.V., Al-Taher F., Yashin A., Revelsky I., Yashin Y. Cranberry: Chemical Composition, Antioxidant Activity and Impact on Human Health: Overview // Molecules. 2022. Vol. 27, no. 5. Article 1503. <https://doi.org/10.3390/molecules27051503>.
91. Klavins L., Kviesis J., Klavins M. Comparison of methods of extraction of phenolic compounds from American cranberry (*Vaccinium macrocarpon* L.) press residues // Agronomy Research. 2017. Vol. 15. Pp. 1316–1329.
92. Milea S.A., Aprodu I., Vasile A.M., Barbu V., Răpeanu G., Bahrim G.E., Stănciuc N. Widen the functionality of flavonoids from yellow onion skins through extraction and microencapsulation in whey proteins hydrolysates and different polymers // Journal of Food Engineering. 2019. Vol. 251. Pp. 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.003>.
93. Oancea S., Radu M., Olosutean H. Development of ultrasonic extracts with strong antioxidant properties from red onion wastes // Romanian Biotechnological Letters. 2020. Vol. 25, no. 2. Pp. 1320–1327. <https://doi.org/10.25083/rbl/25.2/1320.1327>.
94. Nile A., Gansukh E., Park G.-S., Kim D.-H., Nile S.H. Novel insights on the multi-functional properties of flavonol glucosides from red onion (*Allium cepa* L) solid waste – In vitro and in silico approach // Food Chemistry. 2021. Vol. 335. Article 127650. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127650>.
95. Stoica F., Rațu R.N., Veleșcu I.D., Stănciuc N., Răpeanu G. A comprehensive review on bioactive compounds, health benefits, and potential food applications of onion (*Allium cepa* L.) skin waste // Trends in Food Science & Technology. 2023. Vol. 141. Article 104173. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104173>.

96. Bozinou E., Pappas I.S., Patergiannakis I.-S., Chatzimitakos, T., Palaogiannis, D., Athanasiadis, V., Lalas S.I., Chatzilazarou A., Makris D.P. Evaluation of Antioxidant, Antimicrobial, and Anticancer Properties of Onion Skin Extracts // Sustainability. 2023. Vol. 15. Article 11599. <https://doi.org/10.3390/su151511599>.
97. Ren F., Nian Y., Perussello C.A. Effect of storage, food processing and novel extraction technologies on onions flavonoid content: A review // Food Research International. 2020. Vol. 132. Article 108953. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108953>.
98. Benito-Román Ó., Blanco B., Sanz M.T., Beltrán S. Freeze-dried extract from onion (*Allium cepa* cv. Horcal) skin wastes: Extraction intensification and flavonoids identification // Food and Bioproducts Processing. 2021. Vol. 130. Pp. 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.09.005>.
99. Chernukha I., Kupaeva N., Khvostov D., Bogdanova Y., Smirnova J., Kotenkova E. Assessment of Antioxidant Stability of Meat Pâté with *Allium cepa* Husk Extract // Antioxidants. 2023. Vol. 12. Article 1103. <https://doi.org/10.3390/antiox12051103>.
100. Bozinou E., Lakka A., Poulianiti K., Stavros Lalas S., Makris D.P. Cyclodextrins as high-performance green co-solvents in the aqueous extraction of polyphenols and anthocyanin pigments from solid onion waste // European Food Research and Technology. 2021. Vol. 247. Pp. 2831–2845. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03839-2>.
101. Filho E.G.A., Lima M., Silva L., Ribeiro P., Tiwari B.K., Fernandes F.N., Brito E.S. Green Ultrasound-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Button Mushrooms, Potatoes, and Onion Peels // ACS Food Science & Technology. 2021. Vol. 1, no. 7. Pp. 1274–1284. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00153>.
102. Kultys E., Kurek M.A. Green Extraction of Carotenoids from Fruit and Vegetable Byproducts: A Review // Molecules. 2022. Vol. 27. Article 518. <https://doi.org/10.3390/molecules27020518>.
103. Meléndez-Martínez A.J., Patricia Esquivel P., Delia B., Rodríguez-Amaya D.B. Comprehensive review on carotenoid composition: Transformations during processing and storage of foods // Food Research International. 2023. Vol. 169. Article 112773. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112773>.
104. Salehi L., Taghian Dinani S. Application of electrohydrodynamic ultrasonic procedure for extraction of β -carotene from carrot pomace // Food Measure. 2020. Vol. 14. Pp. 3031–3039. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00542-w>.
105. Umair M., Jabbar S., Nasiru M.M., Lu Z., Zhang J., Abid M., Murtaza M.A., Kieliszek M., Zhao L. Ultrasound-Assisted Extraction of Carotenoids from Carrot Pomace and Their Optimization through Response Surface Methodology // Molecules. 2021. Vol. 26(22). Article 6763. <https://doi.org/10.3390/molecules26226763>.
106. Vo T.P., Tran H.K.L., Ta T.M.N., Nguyen H.T.V., Phan T.H., Nguyen T.H.P., Nguyen V.K., Dang T.C.T., Nguyen L.G.K., Chung T.Q., Nguyen D.Q. Extraction and Emulsification of Carotenoids from Carrot Pomaces Using Oleic Acid // ACS omega. 2023. Vol. 8, no. 42. Pp. 39523–39534. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05301>.
107. Goula A.M., Ververi M., Adamopoulou A., Kaderides K. Green Ultrasound-Assisted Extraction of Carotenoids from Pomegranate Wastes Using Vegetable Oils // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. Vol. 34. Pp. 821–830. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.07.022>.
108. Murador D.C., Braga A.R.C., Martins P.L.G., Mercadante A.Z., de Rosso V.V. Ionic liquid associated with ultrasonic-assisted extraction: A new approach to obtain carotenoids from orange peel // Food Research International. 2019. Vol. 126. Article 108653. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108653>.
109. Sharma M., Bhat R. Extraction of Carotenoids from Pumpkin Peel and Pulp: Comparison between Innovative Green Extraction Technologies (Ultrasonic and Microwave-Assisted Extractions Using Corn Oil) // Foods. 2021. Vol. 10. Article 787. <https://doi.org/10.3390/foods10040787>.
110. Ajlouni S., Premier R., Tow W.W. Improving Extraction of Lycopene from Tomato Waste By-Products Using Ultrasonication and Freeze Drying // World Journal of Advanced Research and Reviews. 2020. Vol. 5, no. 2. Pp. 177–185. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2020.5.2.0044>.
111. Viñas-Ospino A., López-Malo D., Esteve M.J., Frígola A., Blesa J. Green Solvents: Emerging Alternatives for Carotenoid Extraction from Fruit and Vegetable By-Products // Foods. 2023. Vol. 12. Article 863. <https://doi.org/10.3390/foods12040863>.
112. Coelho T.L.S., Silva D.S.N., dos Santos Junior J.M., Dantas C., de Araujo Nogueira A.R., Lopes Júnior C.A.L., Vieira E.C. Multivariate optimization and comparison between conventional extraction (CE) and ultrasonic-assisted extraction (UAE) of carotenoid extraction from cashew apple // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. Vol. 84. Article 105980. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105980>.
113. Quiroz J.O., Duran A.M.N., García M.S., Gomez G.L.C., Camargo J.J.R. Ultrasound-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Annatto Seeds, Evaluation of Their Antimicrobial and Antioxidant Activity, and Identification of Main Compounds by LC/ESI-MS Analysis // International Journal of Food Science. 2019. Article 3721828. <https://doi.org/10.1155/2019/3721828>.
114. Dadan M., Nowacka M. The Assessment of the Possibility of Using Ethanol and Ultrasound to Design the Properties of Dried Carrot Tissue // Applied Sciences. 2021. Vol. 11(2). Article 689. <https://doi.org/10.3390/app11020689>.
115. Zannou O., Oussou K.F., Chabi I.B., Odouaro O.B.O., Deli M.G.E.P., Goksen G., Vahid A.M., Kayodé A.P.P., Kelebek H., Sellì S., Galanakis C.M. A comprehensive review of recent development in extraction and encapsulation techniques of betalains // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. Pp. 1–20. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2235695>.
116. Bangar S.P., Sharma N., Sanwal N., Lorenzo J.M., Sahu J. Bioactive potential of beetroot (*Beta vulgaris*) // Food Research International. 2022. Vol. 158. Article 111556. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111556>.

117. Brzezowska J., Skrzypczak K., Radzki W., Turkiewicz I.P., Ziaja-Sołtys M., Bogucka-Kocka A., Wojdyło A., Michalska-Ciechanowska A. Comparative study of antioxidant, antiglycation and chemoprotective potential of beetroot juice powder formulations with functional carriers // *Food Bioscience*. 2023. Vol. 55. Article 103049. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103049>.
118. Sentkowska A., Pyrzyńska K. Old-Fashioned, but Still a Superfood – Red Beets as a Rich Source of Bioactive Compounds // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Article 7445. <https://doi.org/10.3390/app13137445>.
119. Zhou Y., Tian Y., Yang B. Root vegetable side streams as sources of functional ingredients for food, nutraceutical and pharmaceutical applications: The current status and future prospects // *Trends in Food Science & Technology*. 2023. Vol. 137. Pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.05.006>.
120. Martínez-Rodríguez P., Guerrero-Rubio M.A., Henarejos-Escudero P., García-Carmona F., Gandía-Herrero F. Health-promoting potential of betalains in vivo and their relevance as functional ingredients: A review // *Trends in Food Science & Technology*. 2022. Vol. 122. Vol. 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.020>.
121. Sadowska-Bartosz I., Bartosz G. Biological Properties and Applications of Betalains // *Molecules*. 2021. Vol. 26, no. 9. Article 2520. <https://doi.org/10.3390/molecules26092520>.
122. Thiruvengadam M., Chung I.M., Samynathan R. Chandar S.R.H., Venkidasamy B., Sarkar T., Rebezov M., Gorelik O., Shariati M., Simal-Gandara J. A comprehensive review of beetroot (*Beta vulgaris* L.) bioactive components in the food and pharmaceutical industries // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. Vol. 64. Pp. 708–739. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2108367>.
123. Fu Y., Shi J., Xie S.Y., Zhang T.Y., Soladoye O.P., Aluko R.E. Red Beetroot Betalains: Perspectives on Extraction, Processing, and Potential Health Benefits // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2020. Vol. 68, no. 42. Pp. 11595–11611. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04241>.
124. Lechner J.F., Stoner G.D. Red Beetroot and Betalains as Cancer Chemopreventative Agents // *Molecules*. 2019. Vol. 24. Article 1602. <https://doi.org/10.3390/molecules24081602>.
125. Rahimi P., Abedimanesh S., Mesbah-Namin S.A., Ostadrahimi A.B. The Nature-Inspired Pigments in Health and Diseases // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. Vol. 59, no. 18. Pp. 2949–2978. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1479830>.
126. Nirmal N.P., Mereddy R., Maqsood S. Recent developments in emerging technologies for beetroot pigment extraction and its food applications Review // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 356, no. 24. Article 129611. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129611>.
127. Abedi-Firoozjah R., Parandi E., Heydari M., Kolahdouz-Nasiri A., Bahraminejad M., Mohammadi R., Rouhi M., Garavand F. Betalains as promising natural colorants in smart/active food packaging // *Food Chemistry*. 2023. Vol. 424, no. 8. Article 136408. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136408>.
128. Fernando G.S.N., Wood K., Papaioannou E.H., Marshall L.M., Sergeeva N.N., Boesch C. Application of an Ultrasound-Assisted Extraction Method to Recover Betalains and Polyphenols from Red Beetroot Waste // *ACS Sustainable Chem.* 2021. Vol. 9, no. 26. Pp. 8736–8747. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01203>.
129. Lazăr S., Constantin O.E., Stănciuc N., Aprodu I., Croitoru C., Răpeanu G. Optimization of Betalain Pigments Extraction Using Beetroot by-Products as a Valuable Source // *Inventions*. 2021. Vol. 6, no. 3. Article 50. <https://doi.org/10.3390/inventions6030050>.
130. Zin M.M., Bánvölgyi S. Emerging technology approach for extractability and stability of betalains from the peel of beetroot (*Beta vulgaris* L.) // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. Vol. 13. Pp. 10759–10769. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01975-z>.
131. Maran J.P., Priya B. Multivariate Statistical Analysis and Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Natural Pigments from Waste Red Beet Stalks // *Journal of Food Science and Technology*. 2016. Vol. 53, no. 1. Pp. 792–799. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1988-8>.
132. Nutter J., Fernandez M.V., Jagus R.J., Agüero M.V. Development of an aqueous ultrasound-assisted extraction process of bioactive compounds from beet leaves: A proposal for reducing losses and increasing biomass utilization // *Journal of Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 101, no. 5. Pp. 1989–1997. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10815>.
133. Nouairi M.E.A., Freha M., Bellil A. Study by absorption and emission spectrophotometry of the efficiency of the binary mixture (Ethanol-Water) on the extraction of betanin from red beetroot // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2021. Vol. 260. Article 119939. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119939>.
134. Šeremet D., Durgo K., Jokić S., Huđek A., Vojvodić Cebin A., Mandura A., Jurasović J., Komes D. Valorization of Banana and Red Beetroot Peels: Determination of Basic Macrocomponent Composition, Application of Novel Extraction Methodology and Assessment of Biological Activity In Vitro // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 11. Article 4539. <https://doi.org/10.3390/su12114539>.

Поступила в редакцию 13 февраля 2024 г.

После переработки 25 марта 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

Pogorelov A.G.¹, Ipatova L.G.¹, Pogorelova V.N.¹, Panait A.I.¹, Stankevich A.A.¹, Suvorov O.A.^{1,2*} ULTRASONIC EXTRACTION OF PIGMENTS FROM VEGETABLE RAW MATERIALS. REVIEW

¹ Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, RAS, Institutskaya st., 3, Pushchino, 142290, Russia, SuvorovOA@yandex.ru

² Russian Biotechnology University, Volokolamsk highway, 11, Moscow, 125080, Russia

This review summarizes and analyzes methods for isolating plant pigments (anthocyanins, betalains, carotenoids) by ultrasonic extraction from secondary plant resources in the food industry. Extracting dyes from plant waste makes it possible to simultaneously improve the depth of processing of raw materials, reduce the burden on the environment and increase the production volumes of natural dyes. In addition, plant pigments are low-molecular substances that have the functions of physiologically active compounds. The review presents materials from the Scopus (scopus.com), Google Scholar (scholar.google.ru) and RSCI (elibrary.ru) databases, published mainly for the period 2019-2023. Articles devoted to the extraction of coloring substances from waste processing of food plant raw materials and the advantages of ultrasonic extraction were analyzed. 134 articles were analyzed, of which 41% of publications were published in the last two years.

The advantages of ultrasonic extraction are shown, including the ability to eliminate the use or significantly reduce the volume of organic solvents, allowing this method to be defined as a “green” technology. The emphasis is on secondary raw materials, common in our country, which accumulate after processing cranberries, onions, carrots, and beets. Works devoted to the study of the influence of ultrasound on the extraction of plant pigments confirm the relevance of the research topic. A number of promising areas include: improvement of the ultrasonic extraction method, including optimization of processing methods and modes, as well as the search for effective combinations of ultrasound with other gentle extraction methods.

Keywords: secondary plant resources, anthocyanins, carotenoids, betalains, quercetins, ultrasonic extraction.

For citing: Pogorelov A.G., Ipatova L.G., Pogorelova V.N., Panait A.I., Stankevich A.A., Suvorov O.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 1, pp. 31–56. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250114798>.

References

1. Katsampa P., Valsamedou E., Grigorakis S., Makris D.P. *Industrial Crops and Products*, 2015, vol. 77, no. 23, pp. 535–543. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.039>.
2. Chadorshabi S., Hallaj-Nezhadi S., Ghasempour Z. *Food Chemistry*, 2022, vol. 386, article 132737. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132737>.
3. Celano R., Docimo T., Piccinelli A.L., Gazzerri P., Tucci M., Di Sanzo R., Carabetta S., Campone L., Russo M., Rastrelli L. *Antioxidants*, 2021, vol. 10, 304. <https://doi.org/10.3390/antiox10020304>.
4. Carpentieri S., Soltanipour F., Ferrari G., Pataro G., Donsi F. *Antioxidants*, 2021, vol. 10, 1417. <https://doi.org/10.3390/antiox10091417>.
5. Wani F.A., Rashid R., Jabeen A., Brochier B., Yadav S., Aijaz T., Makroo H.A., Dar B.N. *International Journal of Food Science & Technol.*, 2021, vol. 56, 4823. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15267>.
6. Waseem M., Majeed Y., Nadeem T., Naqvi L.H., Khalid M.A., Sajjad M.M., Sultan M., Khan M., Khayrullin M., Shariati M.A., Lorenzo J.M. *Food Frontiers*, 2023, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1002/fft2.296>.
7. Diaconeasa Z., Iuhas C.I., Ayvaz H., Mortas M., Farcaş A., Mihai M., Danciu C., Stanilă A. *Plants*, 2023, vol. 12, p. 74. <https://doi.org/10.3390/plants12010074>.
8. Younas A., Kiran S., Abrar S., Javed S., Gulzar T. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2022, vol. 31, no. 6, pp. 5945–5954. <https://doi.org/10.15244/pjoes/151862>.
9. Benucci I., Lombardelli C., Mazzocchi C., Esti M. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, vol. 21, pp. 2715–2737. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12951>.
10. Taban B.M., Stavropoulou E., Winkelströter L., Bezirtzoglou E. *Food Science and Technology*, 2022, vol. 42, article 43121. <https://doi.org/10.1590/fst.43121>.
11. Mir S.A., Rizwan D., Bakshi R.A., Wani S.M., Masoodi F.A. *Extraction of Natural Products from Agro-Industrial Wastes. A Green and Sustainable Approach*. Amsterdam, Netherlands, 2023, pp. 157–178. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823349-8.00016-2>.
12. Mir-Cerda A., Nunez O., Granados M., Sentellas S., Saurina J. *Trends in Analytical Chemistry*, 2023, vol. 161, article 116994. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116994>.
13. Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.G., Meullemiestre A., Fabiano-Tixier A.S., Abert-Vian M. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 34, pp. 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>.
14. García S.L.R., Raghavan V. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, vol. 62, no. 23, pp. 6446–6466. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1901651>.
15. Rifna E.J., Misra N.N., Dwivedi M. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, vol. 63, no. 6, pp. 719–752. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1952923>.
16. Gardana C., Scialpi A., Fachechi C., Simonetti P. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 4, article 03863. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03863>.
17. Ordóñez-Santos L.E., Esparza-Estrada J., Vanegas-Mahecha P. *LWT – Food Science and Technology*, 2021, vol. 139, article 110598. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110598>.
18. Sharma M., Usmani Z., Gupta V.K., Bhat R. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2021, vol. 41, no. 4, pp. 535–563. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1873240>.

* Corresponding author.

19. Chernukha I., Fedulova L., Vasilevskaya E., Kulikovskii A., Kupaeva N., Kotenkova E. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, vol. 28, no. 5, pp. 2877–2885. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.02.020>.
20. Fidelis M., de Moura C., Kabbas J.T., Pap N., Mattila P., Mäkinen S., Putnik P., Bursac Kovačević D., Tian Y., Yang B., Granato D. *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 21, article 3854. <https://doi.org/10.3390/molecules24213854>.
21. Kumar M., Barbhai M.D., Hasan M., Dhumal S., Singh S., Pandiselvam R., Rais N., Natta S., Senapathy M., Sinha N., Amarowicz R. *Journal of Food Science*, 2022, vol. 87, pp. 4289–4311. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16297>.
22. More P.R., Arya S.S. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, vol. 7, no. 5, article 103306. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103306>.
23. Prodromidis P., Mourtzinis I., Biliaderis C.G., Moschakis T. *Food Chemistry*, 2022, vol. 386, no. 30, article 132750. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132750>.
24. Carrillo C., Nieto G., Martínez-Zamora L., Ros G., Kamiloglu S., Munekata P.E.S., Pateiro M., Lorenzo J.M., Fernández-López J., Viuda-Martos M., Pérez-Álvarez J.A., Barba F.J. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, vol. 70, no. 23, pp. 6864–6883. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07208>.
25. Filipčev B. *Feed additives*. London, 2020, pp. 279–294. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814700-9.00016-9>.
26. Lianza M., Marincich L., Antognoni F. *Antioxidants*, 2022, vol. 11, article 2169. <https://doi.org/10.3390/antiox11112169>.
27. Sanna D., Fadda A. *Nutraceuticals*, 2022, vol. 2, no. 4, pp. 365–383. <https://doi.org/10.3390/nutraceuticals2040028>.
28. Kumar G., Upadhyay S., Yadav D.K., Malakar S., Dhurve P., Suri S. *Journal of food process engineering*, 2023, vol. 46, no. 6, article 14238. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14238>.
29. Hu Y., Yan B., Chen Z.S., Wang L., Tang W., Huang C. *Journal of Renewable Materials*, 2022, vol. 10, no. 6, pp. 1471–1490. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.018811>.
30. Rodríguez-Mena A., Ochoa-Martínez L.A., González-Herrera S.M., Rutiaga-Quinones O.M., González-Laredo R.F., Olmedilla-Alonso B. *Food Chemistry*, 2023, vol. 398, article 133908. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133908>.
31. Panasyuk A.L., Kuz'mina Ye.I., Yegorova O.S. *Pishcheyaya promyshlennost'*, 2021, no. 10, pp. 13–19. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.10.10.017>. (in Russ.).
32. Linares G., Rojas M.L. *Frontiers in Nutrition*, 2022, vol. 9, article 891462. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.891462>.
33. Gil-Martín E., Forbes-Hernandez T., Romero A., Cinciosi D., Giampieri F., Battino M. *Food Chemistry*, 2022, vol. 378, article 131918. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131918>.
34. Rodríguez De Luna S.L., Ramírez-Garza R.E., Saldívar S.O. *The Scientific World Journal*, 2020, vol. 2020, article 6792069. <https://doi.org/10.1155/2020/6792069>.
35. Bitwell C., Indra S.S., Lukec C., Kakoma M.K. *Scientific African*, 2023, vol. 19, article 01585. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01585>.
36. Chaves J.O., de Souza M.C., da Silva L.C., Lachos-Perez D., Torres-Mayanga P.C., Machado A.P.F., Forster-Carneiro T., Vázquez-Espinosa M., González-de-Peredo A.V., Barbero G.F., Rostagno M.A. *Frontiers in Chemistry*, 2020, vol. 8, article 507887. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.507887>.
37. Soquetta M.B., De Marsillac Terra L., Bastos C.P. *CyTA – Journal of Food*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 400–412. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.141197>.
38. Lombardelli C., Benucci I., Mazzocchi C., Esti M. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 23, article 12249. <https://doi.org/10.3390/app122312249>.
39. Nishad J., Saha S., Kaur C. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, vol. 43, no. 4, pp. 14046.1–14046.13. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14046>.
40. Güldane M., Cingöz A. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*, 2023, vol. 11(s1), pp. 2589–2594. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v11i1s1.2589-2594.6513>.
41. Lončarić A., Celeiro M., Jozinović A., Jelinić J., Kovač T., Jokić S., Babić J., Moslavac T., Zavadlav S., Lores M. *Foods*, 2020, vol. 9, no. 11, article 1521. <https://doi.org/10.3390/foods9111521>.
42. Grassino A.N., Ostoji J., Mileti V., Djakovi S., Bosiljkov T., Zorić Z., Ježek D., Rimac S., Brncić M. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, vol. 64, article 102424. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102424>.
43. Jha A.K., Sit N. *Trends in Food Science. Technology*. 2022, vol. 119, pp. 579–591. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.019>.
44. Yusoff I.M., Taher Z.M., Rahmat Z., Chua L.S. *Food Research International*, 2022, vol. 157, article 111268. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111268>.
45. Somushkin D.N., Ziganshin B.U., Somushkin N.I., Dmitriyev A.V., Maksimov I.I., Kazakov Yu.F. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*, 2023, no. 1 (45), pp. 78–88. (in Russ.).
46. Das P., Nayak P.K., Kesavan R.K. *Food Chemistry Advances*, 2022, vol. 1, article 100144. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100144>.
47. Zabol G.L., Viganó J., Silva E.K. *Molecules*, 2021, vol. 26, article 5117. <https://doi.org/10.3390/molecules26175117>.
48. Lavilla I., Bendicho C. *Water Extraction of Bioactive Compounds*. Amsterdam: Elsevier, 2017, pp. 291–316. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809380-1.00011-5>.
49. Yelapov A.A., Kuznetsov N.N., Marakhova A.I. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 96–116. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-4-96-116>. (in Russ.).
50. Tena N., Asuero A.G. *Antioxidants*, 2022, vol. 11, no. 2, article 286. <https://doi.org/10.3390/antiox11020286>.

51. Tang J., Zhu X., Jambrak A.R., Sun D.W., Tiwari B.K. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, vol. 17, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2201834>.
52. Nowacka M., Wedzik M. *Applied Acoustics*, 2016, vol. 103, pp. 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.06.011>.
53. Belwal T., Huang H., Li L., Duan Z., Zhang X., Aalim H., Luo Z. *Food Chemistry*, 2019, vol. 297, article 124993. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124993>.
54. Morata A., Escott C., Loira I., López C., Palomero F., González C. *Antioxidants*, 2021, vol. 10, article 1863. <https://doi.org/10.3390/antiox10121863>.
55. Zhumagaliyeva Sh.N., Amanzholk, yzy A., Sultanova N.A., Abilov Zh.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2021, no. 3, pp. 283–289. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021038695>. (in Russ.).
56. Kumara K., Srivastava S., Sharanagat V.S. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 70, article 105325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325>.
57. Manzoor M., Singh J., Gani A., Noor N. *Food Chemistry*, 2021, vol. 362, no. 11, article 130141. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130141>.
58. Mesquita L.M.S., Martins M., Pisani L.P., Ventura S.P., Rosso V.V. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, vol. 20, no. 1, pp. 787–818. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12685>.
59. Yuan J., Li H., Tao W., Han Q., Dong H., Zhang J., Jing Y., Wang Y., Xiong Q., Xu T. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, vol. 68, article 105192. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105192>.
60. Miranda P.H.S., Santos A.C., Freitas B.C.B., Souza Martins G.A., Vilas Boas E.V.D.B., Damiani C. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, vol. 113, pp. 335–345. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.047>.
61. Sigurdson G.T., Tang P., Giusti M.M. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 261–280. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-025923>.
62. Sabino L.B.S., Alves Filho A.E.G., Fernandes F.A.N., Brito E.S., Silva Júnior I.J. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, vol. 127, pp. 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.02.012>.
63. Machado A.P.F., Sumere B.R., Mekaru C., Martinez J., Bezerra R.M.N., Rostagno M.A. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, vol. 54, pp. 2792–2801. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14194>.
64. Nunes A.N., Borges A., Matias A.A., Bronze M.R., Oliveira J. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 2, article 368. <https://doi.org/10.3390/molecules27020368>.
65. Tan J., Han Y., Han B., Qi X., Cai X., Ge S., Xue H. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2022, vol. 8, article 100306. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100306>.
66. Muhammad D.R.A., Wikandari R. *Berry Bioactive Compound By-Products*. Academic Press, 2023, pp. 1–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95600-0.00007-9>.
67. Zeng Y., Zhou W., Yu J., Zhao L., Wang K., Hu Z., Liu X. *Antioxidants*, 2023, vol. 12, article 418. <https://doi.org/10.3390/antiox12020418>.
68. Gordillo B., Sigurdson G.T., Lao F., González-Miret M.L., Heredia F.J., Giusti M. *Food Research International*, 2018, vol. 106, pp. 791–799. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.057>.
69. Zhao Y., Tran K., Brennan M., Brennan C. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, vol. 56, no. 6, pp. 2687–2695. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14898>.
70. Ramesh M., Muthuraman A. *Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes. Handbook of Food Bioengineering*. 2018, pp. 1–28. DOI: 10.1016/b978-0-12-811518-3.00001-6.
71. Nistor M., Pop R., Daescu A., Pinte A., Socaciu C., Rugina D. *Molecules*, 2022, vol. 27, article 4254. <https://doi.org/10.3390/molecules27134254>.
72. Wu H., Oliveira G., Lila M.A. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023, vol. 22, pp. 333–354. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13070>.
73. Zang Z., Tang S., Li Z., Chou S., Shu C., Chen Y., Chen W., Yang S., Yang Y., Tian J., Li B. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 2022, vol. 21, no. 5, pp. 4378–4401. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13026>.
74. Rocha F., Rezende J.P., dos Santos Dias M.M., Arruda P.V.R., Stringheta P.C., dos Santos Pires A.C., Teixeira Ribeiro Vidigal M.C. *Food Research International*, 2023, vol. 163, article 112277. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112277>.
75. Farooq S., Shah M.A., Siddiqui M.W., Dar B.N., Mir S.A., Ali A. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, vol. 14, pp. 3508–3519. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00598-8>.
76. Alrugaibah M., Yagiz Y., Gu L. *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 255, article 17720. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117720>.
77. Constantin O.E., Istrati D.I. *Horticulturae*, 2022, vol. 8, article 1084. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111084>.
78. Guo Y., Zhang H., Shao S., Sun S., Yang D., Lv S. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, vol. 57, no. 12, pp. 7573–7591. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16132>.
79. Liao J., Xue H., Li J., Peng L. *Food Science and Technology*, 2022, vol. 42, article 20922. <https://doi.org/10.1590/fst.20922>.
80. Makarova N.V., Yeremeyeva N.B. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 1, pp. 167–177. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020014425>. (in Russ.).
81. Bamba B.S.B., Shi J., Tranchant C.C., Xue S.J., Forney C.F., Lim L-T. *Molecules*, 2018, vol. 23, article 1685. <https://doi.org/10.3390/molecules23071685>.

82. Colletti A., Sangiorgio L., Martelli A., Testai L., Cicero A.F.G., Cravotto G. *Nutrients*, 2021, vol. 13, article 2546. <https://doi.org/10.3390/nu13082546>.
83. Selahvarzi A., Ramezan Y., Sanjabi M.R., Namdar B., Akbarmivehie M., Mirsaeedghazi H., Azarikia F. *Food Bioscience*, 2022, vol. 49, article 101918. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101918>.
84. Fu X., Wang D., Belwal T., Xie J., Xu Y., Li L., Zou L., Zhang L., Luo Z. *LWT – Food Science and Technology*, 2021, vol. 144, article 111220. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111220>.
85. Chesnokova N.Y., Levochkina L.V., Prikhod'ko Y.V., Kuznetsova A.A., Chebukin P.A. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 848, article 012211. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012211>.
86. Alekseyenko Ye.V., Bakumenko O.Ye., Azarova M.M., Isabayev I.B. *Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya*, 2019, no. 4, pp. 10–23. <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.200>. (in Russ.).
87. Saldaña M.D.A., Martínez E.R., Sekhon J.K., Vo H. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2021, vol. 175, article 105279. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105279>.
88. Xue H., Tan J., Li Q., Cai X. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, vol. 45, no. 7, article 15378. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15378>.
89. Xue H., Tan J., Fan L., Li Q., Cai X. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, vol. 44, article 13688. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13688>.
90. Nemzer B.V., Al-Taher F., Yashin A., Revelsky I., Yashin Y. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 5, article 1503. <https://doi.org/10.3390/molecules27051503>.
91. Klavins L., Kviesis J., Klavins M. *Agronomy Research*, 2017, vol. 15, pp. 1316–1329.
92. Milea S.A., Aprodu I., Vasile A.M., Barbu V., Răpeanu G., Bahrin G.E., Stănciuc N. *Journal of Food Engineering*, 2019, vol. 251, pp. 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.003>.
93. Oancea S., Radu M., Olosutean H. *Romanian Biotechnological Letters*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 1320–1327. <https://doi.org/10.25083/rbl/25.2/1320.1327>.
94. Nile A., Gansukh E., Park G.-S., Kim D.-H., Nile S.H. *Food Chemistry*, 2021, vol. 335, article 127650. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127650>.
95. Stoica F., Rațu R.N., Veleșcu I.D., Stănciuc N., Răpeanu G. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, vol. 141, article 104173. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104173>.
96. Bozinou E., Pappas I.S., Patergiannakis I.-S., Chatzimitakos, T., Palaiogiannis, D., Athanasiadis, V., Lalas S.I., Chatzilazarou A., Makris D.P. *Sustainability*, 2023, vol. 15, article 11599. <https://doi.org/10.3390/su151511599>.
97. Ren F., Nian Y., Perussello C.A. *Food Research International*, 2020, vol. 132, article 108953. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108953>.
98. Benito-Román Ó., Blanco B., Sanz M.T., Beltrán S. *Food and Bioprocesses Processing*, 2021, vol. 130, pp. 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.09.005>.
99. Chernukha I., Kupaeva N., Khvostov D., Bogdanova Y., Smirnova J., Kotenkova E. *Antioxidants*, 2023, vol. 12, article 1103. <https://doi.org/10.3390/antiox12051103>.
100. Bozinou E., Lakka A., Poulitaniti K., Stavros Lalas S., Makris D.P. *European Food Research and Technology*, 2021, vol. 247, pp. 2831–2845. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03839-2>.
101. Filho E.G.A., Lima M., Silva L., Ribeiro P., Tiwari B.K., Fernandes F.N., Brito E.S. *ACS Food Science & Technology*, 2021, vol. 1, no. 7, pp. 1274–1284. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00153>.
102. Kultys E., Kurek M.A. *Molecules*, 2022, vol. 27, article 518. <https://doi.org/10.3390/molecules27020518>.
103. Meléndez-Martínez A.J., Patricia Esquivel P., Delia B., Rodríguez-Amaya D.B. *Food Research International*, 2023, vol. 169, article 112773. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112773>.
104. Salehi L., Taghian Dinani S. *Food Measure*, 2020, vol. 14, pp. 3031–3039. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00542-w>.
105. Umair M., Jabbar S., Nasiru M.M., Lu Z., Zhang J., Abid M., Murtaza M.A., Kieliszek M., Zhao L. *Molecules*, 2021, vol. 26(22), article 6763. <https://doi.org/10.3390/molecules26226763>.
106. Vo T.P., Tran H.K.L., Ta T.M.N., Nguyen H.T.V., Phan T.H., Nguyen T.H.P., Nguyen V.K., Dang T.C.T., Nguyen L.G.K., Chung T.Q., Nguyen D.Q. *ACS omega*, 2023, vol. 8, no. 42, pp. 39523–39534. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05301>.
107. Goula A.M., Ververi M., Adamopoulou A., Kaderides K. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 34, pp. 821–830. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.07.022>.
108. Murador D.C., Braga A.R.C., Martins P.L.G., Mercadante A.Z., de Rosso V.V. *Food Research International*, 2019, vol. 126, article 108653. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108653>.
109. Sharma M., Bhat R. *Foods*, 2021, vol. 10, article 787. <https://doi.org/10.3390/foods10040787>.
110. Ajlouni S., Premier R., Tow W.W. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2020, vol. 5, no. 2, pp. 177–185. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2020.5.2.0044>.
111. Viñas-Ospino A., López-Malo D., Esteve M.J., Frígola A., Blesa J. *Foods*, 2023, vol. 12, article 863. <https://doi.org/10.3390/foods12040863>.
112. Coelho T.L.S., Silva D.S.N., dos Santos Junior J.M., Dantas C., de Araujo Nogueira A.R., Lopes Júnior C.A.L., Vieira E.C. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, vol. 84, article 105980. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105980>.
113. Quiroz J.O., Duran A.M.N., Garcia M.S., Gomez G.L.C., Camargo J.J.R. *International Journal of Food Science*, 2019, article 3721828. <https://doi.org/10.1155/2019/3721828>.
114. Dadan M., Nowacka M. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11(2), article 689. <https://doi.org/10.3390/app11020689>.

115. Zannou O., Oussou K.F., Chabi I.B., Odouaro O.B.O., Deli M.G.E.P., Goksen G., Vahid A.M., Kayodé A.P.P., Kelebek H., Selli S., Galanakis C.M. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2235695>.
116. Bangar S.P., Sharma N., Sanwal N., Lorenzo J.M., Sahu J. *Food Research International*, 2022, vol. 158, article 111556. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111556>.
117. Brzezowska J., Skrzypczak K., Radzki W., Turkiewicz I.P., Ziaja-Sołtys M., Bogucka-Kocka A., Wojdyło A., Michalska-Ciechanowska A. *Food Bioscience*, 2023, vol. 55, article 103049. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103049>.
118. Sentkowska A., Pyrzyńska K. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, article 7445. <https://doi.org/10.3390/app13137445>.
119. Zhou Y., Tian Y., Yang B. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, vol. 137, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.05.006>.
120. Martínez-Rodríguez P., Guerrero-Rubio M.A., Henarejos-Escudero P., García-Carmona F., Gandía-Herrero F. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, vol. 122, pp. 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.020>.
121. Sadowska-Bartosz I., Bartosz G. *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 9, article 2520. <https://doi.org/10.3390/molecules26092520>.
122. Thiruvengadam M., Chung I.M., Samynathan R., Chandar S.R.H., Venkidasamy B., Sarkar T., Rebezov M., Gorelik O., Shariati M., Simal-Gandara J. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, vol. 64, pp. 708–739. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2108367>.
123. Fu Y., Shi J., Xie S.Y., Zhang T.Y., Soladoye O.P., Aluko R.E. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, vol. 68, no. 42, pp. 11595–11611. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04241>.
124. Lechner J.F., Stoner G.D. *Molecules*, 2019, vol. 24, article 1602. <https://doi.org/10.3390/molecules24081602>.
125. Rahimi P., Abedimanesh S., Mesbah-Namin S.A., Ostadrahimi A.B. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, vol. 59, no. 18, pp. 2949–2978. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1479830>.
126. Nirmal N.P., Mereddy R., Maqsood S. *Food Chemistry*, 2021, vol. 356, no. 24, article 129611. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129611>.
127. Abedi-Firoozjah R., Parandi E., Heydari M., Kolahdouz-Nasiri A., Bahraminejad M., Mohammadi R., Rouhi M., Garavand F. *Food Chemistry*, 2023, vol. 424, no. 8, article 136408. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136408>.
128. Fernando G.S.N., Wood K., Papaioannou E.H., Marshall L.M., Sergeeva N.N., Boesch C. *ACS Sustainable Chem.*, 2021, vol. 9, no. 26, pp. 8736–8747. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01203>.
129. Lazăr S., Constantin O.E., Stănciuc N., Aprodu I., Croitoru C., Răpeanu G. *Inventions*, 2021, vol. 6, no. 3, article 50. <https://doi.org/10.3390/inventions6030050>.
130. Zin M.M., Bánvölgyi S. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, vol. 13, pp. 10759–10769. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01975-z>.
131. Maran J.P., Priya B. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, vol. 53, no. 1, pp. 792–799. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1988-8>.
132. Nutter J., Fernandez M.V., Jagus R.J., Agüero M.V. *Journal of Food and Agriculture*, 2021, vol. 101, no. 5, pp. 1989–1997. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10815>.
133. Nouairi M.E.A., Freha M., Bellil A. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, vol. 260, article 119939. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119939>.
134. Šeremet D., Durgo K., Jokić S., Huđek A., Vojvodić Cebin A., Mandura A., Jurasović J., Komes D. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 11, article 4539. <https://doi.org/10.3390/su12114539>.

Received February 13, 2024

Revised March 25, 2024

Accepted June 10, 2024

Сведения об авторах

Погорелов Александр Григорьевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией функциональной микроскопии биоструктур, agpogorelov@rambler.ru

Ипатова Лариса Григорьевна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории функциональной микроскопии биоструктур, larissa_ipatova@bk.ru

Погорелова Валентина Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории функциональной микроскопии биоструктур, agpogorelov@rambler.ru

Панайт Артем Игоревич – младший научный сотрудник лаборатории функциональной микроскопии биоструктур, panaitartem@gmail.com

Станкевич Анна Александровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории функциональной микроскопии биоструктур, repa-pa@yandex.ru

Суворов Олег Александрович – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории функциональной микроскопии биоструктур, профессор кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса, SuvorovOA@yandex.ru

Information about authors

Pogorelov Aleksandr Grigorievich – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Functional Microscopy of Biostructures, agpogorelov@rambler.ru

Ipatova Larisa Grigoryevna – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Functional Microscopy of Biostructures, larissa_ipatova@bk.ru

Pogorelova Valentina Nikolaevna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Functional Microscopy of Biostructures, agpogorelov@rambler.ru

Panait Artem Igorevich – Junior Researcher of the Laboratory of Functional Microscopy of Biostructures, panaitartem@gmail.com

Stankevich Anna Aleksandrovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Functional Microscopy of Biostructures, repa-pa@yandex.ru

Suvorov Oleg Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Functional Microscopy of Biostructures, Professor of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service, SuvorovOA@yandex.ru