

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-515-523>

Поступила 27.06.2025

Поступила после рецензирования 03.11.2025

Принята в печать 17.11.2025

© Березина Е. А., Кийски В. Д., Казанкин Н. А., Кригер О. В., Яковченко Н. В., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ: МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА

Березина Е. А., Кийски В. Д., Казанкин Н. А.*, Кригер О. В., Яковченко Н. В.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

биологически активные вещества, методы выделения БАВ, методы анализа БАВ, экстракция, растительное сырье, антиоксиданты

Биологически активные вещества (БАВ) растительного происхождения играют ключевую роль в разработке функциональных продуктов питания, биодобавок и лекарственных средств, однако их применение ограничено сложностями выделения и низкой стабильностью. Данная статья посвящена исследованию структуры, характеристик и биологического воздействия основных классов БАВ — фенольных соединений, среди которых выделяются флавоноиды, стильбены и лигнаны. Подчеркивается их роль как мощных антиоксидантов и противовоспалительных агентов, а также их влияние на здоровье сердечно-сосудистой системы. Обзор охватывает как традиционные, так и современные способы выделения биоактивных компонентов из растений, такие как мацерация, дистилляция, экстракция методом Сокслета, ультразвуковые, микроволновые и сверхкритические технологии экстрагирования. Подробно освещены спектрофотометрические методики DPPH, ABTS, а также флуоресцентная методика ORAC и ее улучшенная версия ORAC-SIA, предназначенные для оценки общей антиоксидантной способности индивидуальных соединений и их комбинаций при физиологически релевантных значениях кислотности среды. Результаты исследования демонстрируют зависимость выхода БАВ от типа растворителя, гидромодуля и степени измельчения сырья. Параметры экстракции, такие как температура, давление и pH, существенно влияют на сохранность термолabile соединений. Установлено, что модификация структуры циклотидов увеличивает биодоступность пептидных препаратов в 1,5–2 раза. Аналитические методы, такие как ORAC и его модификация ORAC-SIA, позволяют оценивать антиоксидантную активность БАВ в сложных смесях, включая пищевые продукты. На основании проведенного анализа сформулированы выводы о необходимости оптимизации «зеленых» методов экстракции, разработки стандартизированных протоколов анализа и углубленного изучения взаимосвязи «структура–активность» для направленного дизайна БАВ.

Received 27.06.2025

Accepted in revised 03.11.2025

Accepted for publication 17.11.2025

© Berezina E. A., Kiiski V. D., Kazankin N. A., Kriger O. V., Iakovchenko N. V., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES OF PLANT ORIGIN: METHODS OF EXTRACTION AND ANALYSIS

Elizaveta A. Berezina, Vitalina D. Kiiski, Nikita A. Kazankin*, Olga V. Kriger, Natalia V. Iakovchenko

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

KEYWORDS:

biologically active substances, methods of BAS isolation, methods of BAS analysis, extraction, plant raw materials, antioxidants

ABSTRACT

Biologically active substances (BAS) of plant origin play a key role in the development of functional foods, bio-additives and medicines. Their use, however, is restricted by difficulties in extraction and low stability. This paper is devoted to investigation of the structure, characteristics and biological impact of the main BAS classes — phenolic compounds, among which flavonoids, stilbenes and lignans stand out. Their role as potent antioxidants and anti-inflammatory agents, as well as their effect on the health of the cardiovascular system, is emphasized. The review covers both traditional and modern methods for extraction of biologically active components from plants, such as maceration, distillation, extraction by the Soxhlet method, ultrasound, microwave and supercritical technologies of extraction. The authors describe in detail spectrophotometric methods DPPH, ABTS, as well as fluorescent method ORAC and its improved version ORAC-SIA, intended for the assessment of the total antioxidant capacity of individual compounds and their combination upon the physiologically relevant values of the acidity of the environment. The results of the study demonstrate the dependency of the BAS yield on the solvent type, hydromodule and a degree of comminution of raw materials. Extraction parameters such as temperature, pressure and pH significantly affect the preservation of thermolabile compounds. It has been found that modification of the structure of cyclotides increases the bioavailability of peptide preparations by 1.5–2 times. Analytical methods like ORAC and its modification ORAC-SIA allows for assessing the antioxidant activity of BAS in complex mixtures including food products. Based on the performed analysis, the conclusions were made regarding the need for optimization of “green” extraction methods, development of the standardized protocols of analysis and in-depth study of the interrelation “structure–activity” for targeted design of BAS.

1. Введение

Биологически активные вещества (БАВ) растительного происхождения играют ключевую роль в современных исследованиях, посвященных разработке функциональных пищевых продуктов, биологически активных добавок и лекарственных препаратов. Эти соединения обладают антиоксидантной, противовоспалительной, антимикробной активностью и другими полезными для организма человека физиологическими свойствами [1]. Среди наиболее изученных групп БАВ выделяют фенольные соединения, флавоноиды,

алкалоиды, терпены и циклические пептиды, которые все чаще становятся объектом интереса в области пищевой биотехнологии и химии пищи [2]. Развитие современных методов аналитической химии и биотехнологии позволило значительно продвинуться в изучении способов выделения, очистки, идентификации и модификации структуры БАВ с целью повышения их функциональной активности и стабильности в условиях пищевых систем [3]. Такие подходы открывают возможности для создания новых ингредиентов с заданными свойствами, что особенно важно при разработке продуктов пита-

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Березина, Е. А., Кийски, В. Д., Казанкин, Н. А., Кригер, О. В., Яковченко, Н. В. (2025). Биологически активные вещества растительного происхождения: методы выделения и анализа. *Пищевые системы*, 8(4), 515–523. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-515-523>

FOR CITATION: Berezina, E. A., Kiiski, V. D., Kazankin, N. A., Kriger, O. V., Iakovchenko, N. V. (2025). Biologically active substances of plant origin: Methods of extraction and analysis. *Food Systems*, 8(4), 515–523. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-515-523>

ния специального назначения, включая функциональные продукты, спортивное питание и диетические добавки [4].

Особое внимание уделяется использованию безопасных, разрешенных к применению в пищевой промышленности растворителей (этанол, воды, этилацетата), а также экстракции с помощью ультразвука, микроволнового излучения и сверхкритического CO₂, что позволяет минимизировать токсикологические риски и соответствовать требованиям международных стандартов безопасности пищевых продуктов. Одним из перспективных направлений является молекулярная пептидная трансплантация — метод, позволяющий встраивать биоактивные последовательности в устойчивые каркасы, такие как циклотиды, обеспечивая этим повышенную стабильность и биодоступность получаемых соединений [5]. С учетом стремительного развития технологий переработки растительного сырья и роста потребительского интереса к натуральным функциональным продуктам, актуальность исследований, направленных на оптимизацию выделения и анализа БАВ, неуклонно возрастает. Целью данного обзора является систематический анализ современных методов выделения, анализа и модификации биологически активных веществ растительного происхождения, включая фенольные соединения, флавоноиды, алкалоиды и циклические пептиды. Особое внимание уделяется оценке эффективности различных подходов, их экологической безопасности и перспективам практического применения в пищевой и фармацевтической промышленности.

Основные задачи исследования включают:

- 1) Проведение сравнительного анализа традиционных и современных методов экстракции БАВ;
- 2) Оценку эффективности различных аналитических методик для идентификации и количественного определения биологически активных соединений;
- 3) Изучение современных подходов к модификации структуры БАВ с целью повышения их стабильности и биодоступности;
- 4) Выявление ключевых закономерностей между структурными особенностями соединений и их функциональной активностью.

Создание пищевых продуктов функциональной направленности представляет собой динамично развивающуюся отрасль пищевой промышленности. Для разработки таких продуктов на основе растительных ингредиентов необходимо учитывать химическое строение и биохимические особенности БАВ, а также применять комплексный подход при выборе методов экстракции и анализах полученных соединений.

2. Объекты и методы

Для проведения систематического анализа были использованы научные публикации, отобранные из международных библиографических баз данных: Scopus, Web of Science, eLibrary.RU, PubMed, EMBASE и Google Scholar. Поиск литературы проводился с использованием следующих ключевых терминов на русском и английском языках: *биологически активные вещества растительного происхождения, методы выделения БАВ, сверхкритическая флюидная экстракция, ультразвуковая экстракция, циклотиды, пептидная трансплантация, анализ БАВ, антоцианы, вторичные метаболиты, количественная оценка, окислительные радикалы, ВЭЖХ, спектрофотометрия, современные методы анализа БАВ, оценка антиоксидантной активности*. Основными критериями включения публикаций в обзор были:

- Год публикации: преимущественно 2015–2024 гг., с включением отдельных фундаментальных работ более раннего периода;
- Наличие экспериментальных данных по методам выделения, анализа или модификации БАВ;
- Описание методологии исследований и полученных результатов;
- Цитируемость и рейтинг издания (предпочтение отдавалось статьям в журналах Q1–Q2).

Исключались публикации:

- Без подробного описания методов исследования;
- С недостоверными или неподтвержденными результатами;
- Не содержащие данных о структуре или свойствах изучаемых соединений.

3. Основные классы БАВ

Биологически активные вещества (БАВ) — это группа органических соединений, встречающихся в природе и проявляющих высокую биологическую активность. Среди множества известных классов БАВ особое место занимают фенольные соединения.

Фенольные соединения представляют собой обширную группу химических веществ, которые характеризуются наличием одной или нескольких фенольных групп (–ОН), связанных с ароматическим кольцом. Эти соединения широко распространены в растительном

мире и играют важную роль в метаболических процессах растений, включая защиту от ультрафиолетового излучения, патогенов и травоядных организмов. Классификация фенольных соединений включает несколько основных групп, таких как простые фенолы, фенольные кислоты, кумарины, флавоноиды, танины и лигнаны [6]. Каждая из этих групп обладает уникальной структурой и биологической активностью. Флавоноиды известны своими антиоксидантными и противовоспалительными свойствами, что делает их ценными для использования в медицине и пищевой промышленности. Эти соединения демонстрируют выраженную антиоксидантную активность благодаря способности нейтрализовать свободные радикалы, что предотвращает окислительный стресс и связанные с ним повреждения клеток [7]. Галловая кислота служит характерным примером соединения с высокой антиоксидантной активностью. Кроме того, «в результате комплексообразования с циклодекстринами происходит изменение физико-химических свойств и биодоступности различных классов биологически активных соединений» [8]. Это подчеркивает значимость фенольных соединений для изучения их потенциального применения в различных отраслях [9].

Стильбены представляют собой класс биологически активных веществ, обладающих значительным фармакологическим потенциалом. Наиболее изученным представителем этой группы является ресвератрол, который содержится в винограде, в красном вине и в некоторых ягодах. Он известен своими антиоксидантными и противовоспалительными свойствами, что делает его ценным для профилактики и лечения различных заболеваний [10]. Исследования показали, что ресвератрол способствует снижению риска сердечно-сосудистых заболеваний, улучшая функцию эндотелия сосудов и снижая уровень липидов в крови [11]. Кроме того, стильбены проявляют антимикробную активность против ряда патогенных микроорганизмов, включая бактерии и грибки [12]. Эти свойства делают их перспективными для разработки новых терапевтических средств, что подчеркивает их значимость в современной медицине.

Флавоноиды, такие как катехины и кверцетин, являются мощными антиоксидантами, которые способны эффективно нейтрализовать свободные радикалы, предотвращая окислительное повреждение клеток. Это свойство играет ключевую роль в защите организма от хронических заболеваний, включая сердечно-сосудистые и нейродегенеративные расстройства. Механизм действия флавоноидов заключается в их способности отдавать электроны или водородные атомы, что способствует стабилизации свободных радикалов и предотвращает цепные реакции окисления. Таким образом, флавоноиды оказывают значительное положительное влияние на здоровье человека, снижая риск развития различных патологий [13].

Флавоноиды, такие как апигенин и лютеолин, обладают выраженными противовоспалительными свойствами, которые проявляются через их воздействие на биохимические процессы в организме. Они ингибируют синтез провоспалительных цитокинов, таких как интерлейкин-6, и подавляют активность ферментов, участвующих в воспалительных реакциях, таких как циклооксигеназа [14]. Это приводит к снижению интенсивности воспалительных процессов, что особенно важно при лечении хронических воспалительных заболеваний. Благодаря этим свойствам флавоноиды могут быть использованы в качестве природных противовоспалительных средств. Цитрусовые фрукты (например, апельсины и лимоны) являются одними из богатейших природных источников флавоноидов, включая такие соединения, как гесперидин и нарингенин [15]. Эти вещества известны своими мощными антиоксидантными и противовоспалительными свойствами, что делает их ценными для поддержания здоровья. Кроме цитрусовых, флавоноиды также присутствуют в других растениях, таких как ягоды и зеленый чай, что делает их доступными в рационе питания человека.

Среди лигнанов выделяют несколько групп, таких как подофиллотоксины, сесамин и энтеролигнаны. Эти группы различаются по степени насыщенности углеродной цепи, по наличию функциональных групп и по пространственному расположению атомов, что непосредственно влияет на их биологическую активность. Важно отметить, что «поглощение света веществом в ультрафиолетовой и видимой областях спектра зависит от электронной структуры молекулы» [16]. Таким образом, различия в электронной структуре лигнанов могут оказывать влияние на их взаимодействие со светом, что, в свою очередь, сказывается на их биологической активности. Лигнаны широко распространены в растительном мире, и их основными источниками являются семена льна, кунжута, цельные зерна, а также некоторые овощи, такие как брокколи и морковь [17]. Кроме того, стоит отметить, что кукурма «традиционно использовалась в качестве активного компонента в составе фитопрепаратов и в повседневном питании

в качестве самостоятельной приправы» [18]. Регулярное употребление лигнанов связано с улучшением состояния сердечно-сосудистой системы. Эти вещества способствуют снижению воспалительных процессов и повышению эластичности сосудов, что снижает риск развития атеросклероза. Включение лигнанов в рацион положительно влияет на поддержание здоровья сердца и сосудов.

4. Методы выделения биологически активных веществ растительного происхождения

Традиционные методы экстракции включают мацерацию, дистилляцию, прессование, настаивание, сбраживание, перколяцию, отваривание с обратным холодильником, настойку и методы Сокслета. Современные методы экстракции включают в себя жидкостную экстракцию под давлением, сверхкритическую жидкостную экстракцию, экстракцию с помощью ультразвука, микроволновую экстракцию, экстракцию импульсным электрическим полем, ферментативные методы экстракции, а также вариации их параметров.

4.1. Традиционные методы экстракции

Традиционные методы выделения биологически активных веществ растительного происхождения, в частности мацерация и дистилляция, имеют долгую историю использования. Мацерация, будучи одним из старейших методов экстракции, применялась еще в античные времена для получения растительных экстрактов, включая эфирные масла и настойки [19]. Метод мацерации — простой способ экстракции, при котором материал измельчают и помещают в растворитель (вода, этанол, метанол), а затем выдерживают определенное время при комнатной температуре или в термостате. Затем фильтруют экстракт от твердого остатка [20]. Для повышения эффективности процесса смесь периодически перемешивают, улучшая проникновение растворителя в образец. К преимуществам метода относятся простота применения и несложная экспериментальная установка, к недостаткам — продолжительность экстракции и низкую производительность. Метод применим преимущественно для образцов с термоустойчивыми компонентами.

Дистилляция как метод выделения эфирных масел впервые была описана в трудах Авиценны в XI веке [21]. В данном методе образцы кипятят в течение 2–8 часов, при этом пары направляют в холодильник, где они снова превращаются в жидкость. Выделяют водную и паровую дистилляцию. Водяная дистилляция подходит для мелких порошкообразных или небольших размеров растительных материалов. Цвет масел темнее, запах интенсивнее, но большие количества исходного сырья требуют много времени и приводят к разложению некоторых компонентов [22]. Паровая дистилляция — экологичный метод, основанный на применении водяного пара. Эффективность метода высока, особенно для мелкодисперсных образцов. Однако метод включает необходимость большого объема сырья и возможность разрушения летучих компонентов при длительном кипячении.

Еще одним традиционным методом извлечения БАВ является прессование — метод выделения веществ путем приложения давления. Выделяют холодное прессование, сохраняющее полезные летучие компоненты, и горячее прессование. Холодное прессование проходит в четыре стадии: очистка, сушка, дробление и непосредственно прессование, при котором используют гидравлические прессы или механические механизмы с вращающимся поршнем для извлечения масла из растений [23].

Главное преимущество холодного прессования — низкое энергопотребление и отсутствие растворителей и высоких температур, что предотвращает деградацию многих БАВ, однако эффективность холодного прессования ниже, чем у других методов, что затрудняет промышленное производство продукта.

Перколяция также является одним из традиционных методов получения БАВ. Используется перколятор — стеклянный конусообразный аппарат с открытыми концами. Высушенный материал предварительно смешивают с растворителем на 4 часа, затем переносят в перколятор и оставляют на сутки при комнатной температуре. Далее добавляют растворитель до насыщения смеси и открывают нижний конец аппарата, позволяя жидкости медленно стекать под действием силы тяжести. Процесс продолжается добавлением растворителя до максимального выхода экстракта, после чего экстракт отделяется фильтрацией [24]. К преимуществам относится увеличение выхода БАВ за счет максимальной разницы концентраций — постепенное извлечение чистым экстрагентом. К недостаткам можно отнести низкую скорость процесса и большое количество экстрагента [25].

Приготовление отваров также известно с древних времен и основано на кипячении растительного сырья в воде. Продолжительность обычно составляет 15–20 минут, а гидромодуль — 1:4 или 1:16. После

кипячения смесь охлаждают и фильтруют. Исследования показали высокую активность антиоксидантов и содержание фенольных соединений в извлечениях данным методом, но стоит учитывать термостойкость извлекаемых БАВ.

Впервые экстракция Сокслета, а также сам экстрактор описываются в статье, посвященной определению молочного жира в 1879 году [26]. Экстракция Сокслета выполняется специальным устройством, состоящим из колбы с растворителем, над ней — стеклянный цилиндр с сифоном, где хранится образец, верхняя часть — холодильник [27]. Измельченный растительный материал погружают в органический растворитель, который многократно циркулирует между колбой и образцом, пока активный компонент не перейдет в раствор. К преимуществам можно отнести экономию растворителя, так как он циркулирует в системе, а также высокий выход целевых соединений. Недостаток метода — длительное время экстракции.

Рефлюкс — метод твердо-жидкостной экстракции, аналогичный методу Сокслета. Экстрагент кипит при постоянной температуре, образуя пар, который конденсируется обратно в сосуд с образцом. Применяется простая колба с обратным холодильником. Главное преимущество рефлюксной экстракции — высокая эффективность извлечения БАВ, однако её недостатком является длительность процесса [28].

Описанные традиционные методы оставались основными инструментами для получения биологически активных веществ на протяжении веков, однако эти подходы имеют свои ограничения. Например, эффективность извлечения активных веществ в таких методах составляет около 60–70%, что уступает современным технологиям. Это связано с ограниченной возможностью извлечения сложных соединений, а также с высоким расходом времени и ресурсов: высокое потребление энергии, значительные денежные затраты, длительность процесса, потребность в больших объемах растворителей, необходимость последующего выпаривания растворителя и снижение эффективности из-за термического распада чувствительных компонентов. Современные методы экстракции направлены на устранение указанных недостатков. Тем не менее традиционные методы продолжают использоваться благодаря их простоте и доступности, особенно в случаях, где требуется минимальная обработка сырья.

4.2. Современные методы экстракции

Современные методы экстракции биологически активных веществ растительного происхождения представляют собой инновационные подходы, которые направлены на повышение эффективности извлечения целевых соединений с минимальными затратами ресурсов и времени.

Экстракция под высоким давлением — усовершенствованный вид экстракции. Благодаря созданию высокого давления растворитель остается жидким даже при очень высоких температурах [29]. Преимущества ускоренной экстракции растворителями заключаются в возможности автоматизации, быстром времени экстракции, уменьшении расхода растворителя и в возможности выбора различных типов растворителей.

Сверхкритическая флюидная экстракция — процесс экстракции с использованием сверхкритического флюида в качестве растворителя. Флюиды имеют низкую вязкость, нулевое поверхностное натяжение и высокую плотность, что способствует быстрому проникновению в пористые материалы и лучшему растворению компонентов [30]. По сравнению с традиционными методами, данный вид экстракции обладает большей скоростью и эффективностью, применяется в пищевой промышленности, фармацевтике и экологии. Перед употреблением полученных масел требуется дополнительная очистка для удаления нежелательных примесей.

Ультразвуковая экстракция — метод, использующий ультразвуковые волны (как правило, 20–25 кГц) для ускорения перехода активных компонентов из клеток в растворитель. Ультразвук разрушает клеточные стенки, облегчая контакт с растворителем. Система экстракции с помощью ультразвука может быть стабильной или активной. Преимущество метода активной экстракции заключается в том, что активные ингредиенты из образца удаляются, как только они попадают в растворитель [31]. Метод экстракции с помощью ультразвука используется для улучшения качества пищевых продуктов, минимизации потери питательных веществ в продуктах и частичного сохранения витаминов. УЗЭ особенно эффективна для извлечения флавоноидов из растений, таких как гинкго билоба, а также позволяет значительно сократить время обработки [32].

Микроволновая экстракция — современный метод экстракции, при котором микроволновые печи генерируют электромагнитные волны частотой 300–300 000 МГц, позволяющие достичь быстрого

нагрева и разрушения клеточных структур. Существует две системы микроволновой экстракции: закрытая система с регулируемым давлением и температурой, и открытая система атмосферного давления [33]. Закрытые сосуды позволяют повысить давление и температуру, в открытых системах температура определяется точкой кипения растворителя. Микроволновая экстракция эффективнее традиционной, так как позволяет получать высококачественный экстракт за короткий промежуток времени, используя минимальное количество растворителя. Этот метод весьма предпочтителен по сравнению с традиционными методами из-за высокой эффективности экстракции за короткое время с использованием небольшого количества растворителя. Исследования показывают, что микроволновая экстракция, проведенная в течение 10 минут, обеспечила больший выход и большее количество фенольных веществ по сравнению с экстракцией Сокслета, занимавшей 480 минут. Данный метод демонстрирует высокую эффективность при извлечении антиоксидантов из кожуры винограда, что делает его востребованным в производстве функциональных пищевых продуктов.

Экстракция в импульсном электрическом поле также является одним из современных методов экстракции, который увеличивает массообмен, разрушая растительную матрицу. Таким образом, время экстракции сокращается, а эффективность повышается. Данный метод является новой, чистой, безвредной для окружающей среды, эффективной и быстрой системой, как для лабораторного извлечения полифенолов, так и, например, для нефтяной промышленности [34].

При ферментативной экстракции используются гидролизующие ферменты, такие как альфа-амилаза, целлюлаза и пектиназа, позволяющие эффективно извлекать внутриклеточные макромолекулы из природных продуктов [35]. В исследованиях ферментативный метод показал значительное увеличение выхода полисахаридов и хлорогеновой кислоты по сравнению с экстракцией без ферментов. Также применение энзимов целлюлозы и пектиназы позволило увеличить эффективность экстрагирования липофенолов и каротиноидов в десять раз по сравнению с обычной экстракцией растворителями [36].

Одним из наиболее перспективных методов является сверхкритическая флюидная экстракция (SCFE). Метод основан на использовании сверхкритического углекислого газа для эффективного извлечения биологически активных веществ. Уникальные свойства сверхкритического флюида — диффузионная способность и низкая вязкость — обеспечивают его преимущества. SCFE широко применяется для получения кофеина из кофе и экстракции эфирных масел, что делает его незаменимым в пищевой и косметической промышленности [37].

Таким образом, современные методы экстракции не только обеспечивают высокую эффективность извлечения биологически активных веществ, но и способствуют развитию устойчивых технологий в различных отраслях промышленности.

4.3. Сравнительный анализ методов экстракции

Критерии оценки методов экстракции являются основополагающими для выбора наиболее подходящего способа выделения биологически активных веществ из растительного сырья. Одним из ключевых факторов является эффективность извлечения, которая определяется количеством вещества, извлеченного из сырья, относительно его общего содержания. Высокая эффективность позволяет максимально использовать исходное сырье, что особенно важно при работе с редкими или дорогостоящими растительными материалами. Вторым важным критерием является селективность метода, отражающая его способность избирательно выделять целевые соединения, минимизируя извлечение нежелательных примесей. Это особенно значимо при необходимости получения чистого продукта для дальнейшего анализа или использования. Кроме того, при выборе метода экстракции необходимо учитывать энергозатраты и экологическую безопасность. Методы, требующие минимального потребления энергии и использования безопасных для окружающей среды растворителей, имеют преимущество, так как они соответствуют современным требованиям устойчивого развития. Комплексная оценка методов экстракции по этим критериям позволяет не только повысить эффективность процесса, но и минимизировать его воздействие на окружающую среду.

4.4. Аналитические методы исследования биологически активных веществ

Выделенные из вторичных метаболитов растений биологически активные вещества могут содержаться в чистом виде в различных концентрациях. Для различных отраслей промышленности необходимое количество может варьироваться от нескольких миллилитров до сотен литров, учитывая специфику, объемы производства и тип готовой продукции. Несмотря на совершенствование биотехнологических

методов выделения БАВ, анализ содержания имеет огромную роль для стабильного применения, особенно в пищевой промышленности.

Обратимся к пигментам растений, которые придают цвет огромному числу фруктов, ягод и овощей, которые, в свою очередь, являются натуральным сырьем для производства джемов, фруктовых пюре, конфитюров, десертов, соков и т. д. В соковой промышленности широко распространены антоцианы (сопутствующее название — антоцианины), принадлежащие к обширному классу флавоноидов. Именно они придают наиболее яркие и привлекательные красные, оранжевые и фиолетовые оттенки во всей сокосодержащей продукции. Цвет пигмента зависит от pH среды: в кислой среде они красные, в нейтральной — фиолетовые, в щелочной — синие.

Антоцианы, помимо красящих свойств, обладают антиоксидантной активностью, которая снижает риск сердечно-сосудистых заболеваний благодаря нейтрализации свободных радикалов. Ученые из университета Тохоку (Япония) проводили сравнительный анализ агликонов и гликозидов антоцианинов, полученных из черной смородины. Антиоксидантная активность была измерена в нейтральной области pH с использованием системы эмиссии хемилюминесценции в присутствии системы H₂O₂-ацетальдегид. Было обнаружено, что интенсивность зависит от трех факторов: значения pH, агликона и сахара C-3. При увеличении pH от 4,0 до 9,0 интенсивность хемилюминесценции увеличивалась от pH 5,0, достигала максимума при pH 6,0–7,0 и уменьшалась при pH 9,0 [38]. Помимо свойств сильных антиоксидантов, антоцианы обладают противовоспалительными и иммуностимулирующими свойствами.

Коллеги из Самарского медицинского университета разработали метод количественного определения антоцианинов в растительном лекарственном сырье. Полученные результаты способствовали увеличению чувствительности и воспроизводимости аналитических результатов, а также обеспечили сокращение продолжительности анализа по сравнению с прототипом. Данный способ экстракции предполагает извлечение антоцианов из лекарственного растительного сырья в оптимальных условиях. Для этого используют водно-спиртовые смеси с концентрацией этанола не менее 70 % и с добавлением 0,5–1,0 % хлороводородной кислоты. Отбирают две одинаковые аликвоты и помещают в две мерные колбы, в одной из которых объем раствора до метки доводят 95 % спиртом этиловым (раствор сравнения), в другой — 95 % этиловым спиртом, содержащим 0,5 % аммиака (испытуемый раствор). Растворы перемешивают и в течение одной минуты измеряют их оптическую плотность в кювете с толщиной рабочего слоя 10 мм. Измерения проводят при аналитической длине волны 611–630 нм, выбираемой в зависимости от максимума поглощения исследуемого объекта, который соответствует наибольшей разнице оптической плотности между пробой в растворе аммиака и исходным раствором [39]. После получения оптической плотности исследуемого образца рассчитывают сумму антоцианов. Расчет проводят по математической формуле с использованием значений оптической плотности раствора стандартного образца, массы навески анализируемого образца и навески цианидин-3-О-гликозида. Сравняя предлагаемый метод с методикой по ГОСТ 32709-2014¹, можно отметить ряд преимуществ. Одно из них — существенное сокращение времени, необходимого для пробоподготовки.

Способность антоцианинов реагировать изменением цвета на изменения pH-среды напрямую связана с показателями оптической плотности раствора при pH 1,0 и pH 4,5. Указанные значения pH создаются с использованием буферных растворов. В ряде исследуемых образцов при доведении объема до метки с использованием буферного раствора наблюдалось образование слабой опалесценции, предположительно из-за смены растворителя. Появление легкой мутности могло способствовать увеличению оптической плотности. При дифференциальном измерении это, в свою очередь, может привести к занижению результатов.

Больше всего в ягодах содержится антоцианидинов (цианидин, делфинидин, малвединин, пентунин) и флавонолов (кверцетин). Кверцетин содержится в большинстве широко распространенных ягод. Его можно встретить в красных и зеленых сортах винограда [40]. Особенно ценным источником кверцетина являются виноградные косточки [41]. Наряду с другими ягодами, виноград богат антиоксидантами, которые защищают клетки организма от воздействия активных форм кислорода (ROS), предотвращая их разрушение и снижая окислительный стресс [42]. На данный момент известен флуориметрический метод определения абсорбционной емкости по отношению к кислородным радикалам (ROO- и RO-).

¹ ГОСТ 32709-2014 «Продукция соковая. Методы определения антоцианов». М.: Стандартинформ, 2014. — 20 с.

Метод основан на изменении интенсивности флуоресценции в зависимости от времени протекания реакции. Количественное изменение антиоксидантной активности проводится по определению площади между двумя кривыми показаний реакций — в отсутствие и в присутствии антиоксиданта (сокр. ORAC). Необходимым инструментом при использовании данного метода является флуоресцентный зонд (англ. вариант *probe*), который повреждается свободными радикалами, и с помощью этих повреждений, а также при снижении интенсивности флуоресценции, происходит определение содержания антиоксидантов в образце. Чем меньше поврежден зонд, в роли которого чаще всего выступает флуоресцеин, тем больше антиоксидантов и, следовательно, выше индекс ORAC. Другими словами, индекс ORAC показывает количество антиоксидантов в продукте, измеряя его способность нейтрализовать свободные радикалы.

Способность веществ поглощать окислительные радикалы сравнивается с механизмом окислительной деградации липидов, которая, в свою очередь, помогает предотвратить повреждение барьера проницаемости клетки и избежать ее гибели [43]. Окислительная деградация липидов приводит к образованию малонового диальдегида и 4-гидроксиноненала, а также изопропанов из ненасыщенных жирных кислот [44]. Малоновый диальдегид, или MDA, используется в качестве биомаркера для измерения окислительного стресса в различных биологических образцах у пациентов, страдающих широким спектром заболеваний [45], а его повышенное содержание говорит о наличии сосудисто-сердечных и нейродегенеративных заболеваний.

Метод ORAC-SIA, недавно разработанный на основе ORAC, позволяет измерять антиоксидантную активность нескольких образцов пищевых продуктов с применением флуоресцеина в качестве флуоресцентного зонда. Он сокращает время анализа до 5 минут и снижает содержание AAPH на 67 % по сравнению с 90 минутами стандартного метода ORAC. Порядок аспирации был следующим: образец AAPH/стандартный флуоресцеин вводился в поток носителя на водной основе. Расчет антиоксидантной способности производился по высоте пика флуоресцеина, поэтому не требовалось ни времени задержки, ни измерения площади. Предложенный метод показал превосходную точность ($RSD < 3\%$), $LOD_{3,13}$ $\mu\text{моль} \cdot \text{л}^{-1}$ и восстановление 90–107 % [46]. В Таблице 1 представлены широко распространенные продукты, богатые антиоксидантами. Единица измерения ORAC — микромоль тролокс эквивалента на 100 грамм (тролокс — водорастворимый аналог витамина E), известны рекомендации по употреблению продуктов с индексом ORAC от 3000 до 5000 в день [47].

Таблица 1. Продукты с максимальным значением индекса ORAC
Table 1. Products with the maximum value of the ORAC index

№	Продукт	ORAC ($\mu\text{моль TE}/100 \text{ г}$)	Источник
1	Корица молотая	267 536	[48]
2	Асаи	102 700	[47]
3	Magni (порошок)	75 000	[47]
4	Magni (сок ягод)	40 000	[47]
5	Годжи	25 300	[47]
6	Черноплодная рябина	16 062	[48]
7	Клюква	9 584	[47]
8	Черника сорта “Элиот”	8 869	[49]
9	Смородина черная	7 960	[47]
10	Дикая вишня	6 608	[49]
11	Голубика	6 552	[47]
12	Ежевика	5 347	[47]
13	Слива сорта “Блэк Амбер”	4 856	[49]
14	Авокадо Хасс	4 853	[49]
15	Красные яблоки	3 919	[49]
16	Абрикосы	3 158	[49]
17	Малина	2 870	[50]
18	Напиток черничный с белым чаем, пастеризованный	2 361	[51]
19	Груша Азиатская	2 254	[49]

Разработан уникальный метод оценки антиоксидантной активности как отдельных фенольных соединений, так и их смесей с помощью ORAC в кислотных условиях, подобных среде желудка человека. Уровень pH в желудке примерно равен 2, что является

показателем кислотности повышенной группы. В роли смесей могут выступать вина, соки, чай. Было использовано окислительное поглощение флуоресцеина, пиранина и пирогаллолового красного, трех зондов, широко используемых в анализах ORAC, вызванных пероксильными радикалами. В качестве источника пероксильных радикалов использовали дигидрохлорид азобис(2-амидинопропана) (AAPH) [52]. На основе хроматограмм, полученных методами ВЭЖХ и масс-спектрометрии, установлено, что пирогаллол красный сохраняет потенциал молекулы-мишени для пероксильных радикалов в отличие от флуоресцеина и пиранина. Это делает его пригодным для применения в анализе типа ORAC в кислых условиях.

Использование хроматографического метода не является редкостью при анализе БАВ, а наоборот, анализ успешно интегрирован во многие процессы исследования пищевых продуктов, а также является самостоятельным аналитическим инструментом для количественной оценки содержания биологически активных веществ во вторичных метаболитах растений. Современные анализаторы позволяют идентифицировать количественное содержание белков, липидов, аминокислот, моно- и полисахаридов, а также весь список витаминов. ВЭЖХ является универсальным и воспроизводимым методом, он имеет широкое применение в различных областях пищевой индустрии с точки зрения количественной и качественной оценки активных молекул [53]. Для более точного анализа образцов разрабатываются композиты и нанокompозиты в качестве сорбента для высокоэффективной экстракции и сверхчувствительного определения пищевых красителей. Ученые из Университета Салахадина в Эрбле (Ирак) проводили исследование красителя *Allura red AC* (AR). Анализ проводился с использованием чувствительного метода, а именно ультразвуковой сопряженной дисперсионной нанотвердофазной микроэкстракционной спектрофотометрии (UADNSPME-UV-Vis) для AR в качестве предварительного концентрирования и определения пищевого красителя в реальных образцах. Метод основан на первом использовании органического каркаса амарантовой углеродной точки Zn (II), включающего композит бензимидазола (ZIF-7) [54]. Синтезированный нанокompозит обладал значительной адсорбционной емкостью и возможностью повторного использования, а предложенный метод показал превосходную линейность в диапазоне 0,3–7,0 нМ.

ZIF-7 представляет собой тип металлоорганического каркаса (MOF) с кристаллической структурой, в которой тетраэдрические центры переходных металлов связаны имидазольными лигандами. Имеет широкое применение в создании мембран с высокой селективностью и проницаемостью, а также адсорбента газов участвует в катализе химических реакций и в последнее время активно применяется в хроматографическом анализе. Он обладает высокой пористостью и термостабильностью, что делает ZIF-7 перспективным нанокompозитом. Было проведено исследование по синтезу наночастиц серебра путем иммобилизации на микрокристаллах ZIF-7 для восстановления нитроароматических соединений и органических красителей. Каркас имеет отрицательный поверхностный заряд. Данный факт и использование поверхности соединения влияют на образование нитроароматических соединений серебра более высокого порядка [55]. Был предложен простой метод мокрой химии для декорирования высокодисперсных круглых наночастиц Ag на ZIF-7, в результате чего за один шаг получается композит Ag/ZIF-7 (ZA-1). ZA-1 действует как превосходный катализатор для восстановления нитроароматических соединений и органических красителей [56].

Масс-спектрометрия MALDI-TOF (матрица-ассистированная лазерная десорбция-ионизация (MALDI) и времяпролетный детектор (TOF)) является многообещающей стратегией для выявления закономерностей в данных, создавая соответствующую методологию для быстрой и точной идентификации микроорганизмов, белков и пептидов, ДНК и РНК. С помощью данной методики появляется возможность идентификации биомаркеров для определения качества сырья в пищевой промышленности. Более 15 биомаркеров позволили более точно определить профиль здорового и инфицированного лосося [57]. Комбинирование масс-спектрометрии MALDI-TOF и ВЭЖХ позволяет быстро идентифицировать фенольные соединения в смеси и представлять уникальный сокристаллический рисунок для каждой фенольной кислоты. ВЭЖХ может различать фенольные кислоты, а MALDI-TOF MS обеспечивать сопоставимые профили масс (m/z) для образцов [58]. Это комбинированное исследование является быстрым в точной идентификации и структурном анализе фенольных кислот с различными массами.

Для антоцианов использование времяпролетной матрично-активированной лазерной десорбции является новым методом анализа в пищевой промышленности. В сравнении с ВЭЖХ время получения

данных сокращается в 2,5 раза с 70 минут до 20 при пяти точках исследования, но существует риск слабой воспроизводимости от точки к точке в связи с неоднородностью кристаллов матрицы MALDI-TOF. В исследовании сравнительных результатов анализа антоцианов в ягодах голубики высокорослой с помощью ВЭЖХ и MALDI-TOF MS было показано, что увеличенное число активаций на матрице позволяет снизить отклонения в образцах [59]. Анализ антоцианов с помощью комбинации методов открывает возможность существенно сократить время исследования. Разработанный метод позволяет быстро выявлять и количественно определять антоцианы в других пищевых продуктах, что способствует разработке антоциановых «отпечатков пальцев» для изучения различий в сортах фруктов, ягод, овощей и сроках их созревания.

Активность антиоксидантов может быть проверена с помощью различных аналитических методов, связанных с различными свойствами тестируемых соединений, с одной стороны, и с различными стадиями окислительного процесса и различным пониманием роли антиоксидантов, с другой стороны. Особой популярностью пользуются спектрофотометрические методы ABTS и DPPH, зарекомендовавшие себя благодаря простоте анализа, однако существует несопоставимость данных из-за различных вариантов используемых анализов.

Предложение об использовании 2,2'-азино-бис-3-этилбензотиазолин-6-сульфоновой кислоты (ABTS) для измерения общей антиоксидантной активности появилось в конце XX века. Первоначально метод был представлен как аддитивный и заключался в непрерывном образовании ABTS⁺ из субстрата, присутствующего в реакционной среде, в результате действия перекиси водорода в реакции, катализируемой добавлением метмиоглобина [60]. Ввиду частоты случаев завышения результатов была проведена оптимизация метода, когда радикалы предварительно получали из ABTS прямой реакцией с персульфатом калия (пост-аддитивный метод) в течение не менее 6 ч. Затем радикалы разбавляли PBS или этанолом до получения оптической плотности 0,7 и смешивали с образцом. Определение заключалось в измерении остаточных радикалов после предполагаемого времени реакции, которое составляло примерно 5–6 минут [61]. Усовершенствованная методика релевантна к применению как в пищевой промышленности, так и при анализе биоматериалов.

Спектрофотометрический метод основан на способности DPPH, стабильного свободнорадикала, принимать электрон или атом водорода от антиоксидантов, что приводит к изменению цвета раствора. При добавлении антиоксиданта к раствору DPPH антиоксидант отдает свой электрон или атом водорода радикалу DPPH, нейтрализуя его цвет, и принимает фиолетовый оттенок. В работе Брэнда-Уильямса авторы предложили использовать метанольный радикальный раствор (DPPH доступны в виде готовых радикалов — простота их использования, вероятно, влияет на их популярность) для изучения антиоксидантной активности пищевых ингредиентов путем измерения поглощения радикалов, остающихся в реакционной среде [62]. Первоначально время измерения составляло несколько часов, но в дальнейшем улучшение методики позволило значительно сократить показатель вплоть до 30 минут. Одним из недостатков данного способа является использование в качестве растворителей органических соединений, таких как этанол или метанол, что ставит под вопрос анализ водных экстрактов.

5. Проблемы методов выделения и анализа БАВ

Процесс экстракции биологически активных веществ из растительного сырья сопряжен с рядом сложностей. Одной из значимых проблем является выделение целевых соединений из сложных многокомпонентных матриц, характерных для растительных материалов. Эти матрицы содержат широкий спектр химических соединений, включая белки, углеводы, липиды и другие биоорганические вещества, что делает экстракцию целевых веществ, часто представленных в низких концентрациях, чрезвычайно трудной задачей. Химическое разнообразие и сложность растительных матриц требуют применения высокоэффективных методов выделения, обеспечивающих селективность и минимизирующих потери целевых соединений [63]. Дegradaция биологически активных веществ в процессе экстракции является серьезной проблемой, особенно для термолабильных соединений. Например, высокие температуры, часто используемые при традиционных методах экстракции, могут вызывать термическое разрушение таких соединений, как полифенолы и витамины. Кроме того, длительное время обработки способствует их дальнейшей деградации. Эти процессы приводят к снижению биологической активности экстрагируемых веществ, что негативно сказывается на эффективности их последующего использования.

Низкая селективность методов экстракции представляет собой еще одну важную проблему [64]. К примеру, мацерацией зачастую извлекают широкий спектр веществ, включая нежелательные соединения, такие как липиды, белки и другие компоненты, не относящиеся к целевым. Это приводит к необходимости проведения дополнительных стадий очистки, что увеличивает сложность и стоимость процесса. Более того, присутствие нежелательных соединений может осложнить анализ целевых веществ, снижая точность и воспроизводимость результатов.

Примером, демонстрирующим трудности экстракции, является извлечение алкалоидов из растений семейства Пасленовые. Традиционные методы экстракции часто приводят к извлечению значительного количества хлорофиллов, что требует дополнительных стадий очистки для получения чистого продукта. Это не только снижает эффективность процесса, но и увеличивает его продолжительность и затраты. При этом необходимость разработки более селективных и эффективных методов экстракции становится очевидной. В этом контексте стоит отметить, что проведены исследования по экспериментальному обоснованию и разработке условий предварительной обработки ягод клюквы при получении сока с применением различных способов (бланширование, СВЧ, УЗ, ферментативная обработка), обеспечивающие наиболее полную экстракцию в сок антоциановых соединений [65]. Подобные подходы могут послужить основой для оптимизации процессов экстракции алкалоидов, предлагая новые методы, способные повысить эффективность и снизить затраты. При использовании современных способов анализа БАВ все чаще появляются расхождения в результатах при использовании схожих методик. Это следует из вариативности методов, когда предпочтение отдается более быстрому способу исследования. Оптимизация времени пробоподготовки, проведения анализа и сопоставления результатов является важными аспектами при улучшении существующих аналитических методик и разработке новых. Количественные методы анализа направлены на максимально точные показатели определяемых соединений вторичных метаболитов растений. Воспроизводимость и увеличение чувствительности получаемых результатов играет важную роль при выборе типа аналитического исследования.

6. Тенденции развития методов и перспективные направления исследований

Современные технологии миниатюризации, такие как микрофлюидика, открывают новые возможности в области анализа биологически активных веществ. Эти методы позволяют значительно уменьшить объемы используемых реагентов и образцов, что не только снижает затраты, но и минимизирует экологическое воздействие. Например, микрофлюидные чипы, применяемые для анализа сложных биологических систем, обеспечивают высокую точность и эффективность исследований. Такие инновации способствуют развитию более устойчивых и экономически выгодных подходов в химическом анализе. Автоматизация процессов экстракции и анализа играет ключевую роль в снижении влияния человеческого фактора на результаты исследований. Внедрение роботизированных систем в лабораторную практику позволяет значительно повысить точность и воспроизводимость аналитических данных. Например, автоматические экстракторы обеспечивают стабильность условий экстракции, что особенно важно для анализа сложных матриц. Кроме того, автоматизация способствует ускорению аналитических процессов, что важно для исследований, требующих обработки большого количества образцов. Например, автоматизированные системы экстракции используются для определения содержания флавоноидов в растительных экстрактах, что позволяет значительно сократить время анализа и повысить его эффективность. Таким образом, автоматизация становится неотъемлемой частью современных методов анализа. Принципы «зеленой химии» находят все большее применение в области экстракции биологически активных веществ, способствуя повышению экологической безопасности методов. Использование растворителей на основе воды или этанола вместо токсичных органических растворителей позволяет минимизировать вредное воздействие на окружающую среду. Например, экстракция биоактивных веществ с использованием сверхкритического углекислого газа является эффективным и экологически безопасным методом, который активно внедряется в аналитическую практику. Непрерывное развитие индустрии производства нанокмпозитов открывает широкие возможности для исследования возможностей интеграции синтезированных материалов в ускоренный анализ биологически активных веществ. Такие свойства, как термолабильность, твердость, пористость и устойчивость к механическому воздействию, позволяют тестировать наноматериалы в методы хроматографии, получать максимально точные результаты

детектирования, обеспечивают долговечность сорбента. В современных исследованиях методов экстракции и анализа биологически активных веществ (БАВ) особое внимание уделяется разработке инновационных подходов, направленных на повышение эффективности и экологичности процессов. Одним из перспективных направлений является использование методов сверхкритической флюидной экстракции (СФЭ). Этот метод базируется на применении сверхкритических флюидов, таких как углекислый газ, который обладает уникальными физико-химическими свойствами, позволяющими эффективно извлекать целевые компоненты из растительного сырья. Преимущества СФЭ включают снижение расхода органических растворителей, повышение селективности извлечения и уменьшение воздействия на окружающую среду. Исследования, опубликованные в журнале *Green Chemistry*, подтверждают, что внедрение СФЭ способствует улучшению качества экстрагированных БАВ, что делает этот метод перспективным для дальнейшего развития. Использование индекса ORAC для определения антиоксидантной активности, а также его улучшенной версии ORAC-SIA позволяют сокращать время исследования и открывают возможности исследования сложных смесей с содержанием различных групп веществ.

7. Выводы

В современных реалиях создание пищевых продуктов функциональной направленности является стремительно растущей сферой производства. Для получения продукции с заданными свойствами с помощью добавления ингредиентов растительного происхождения необходимо учитывать строение веществ, основные биохимические особенности для определения основного направления обогащения. При выборе методов экстракции и анализа БАВ из растительного сырья важно учитывать безопасность технологии и стабильность извлекаемых соединений. Оптимизация этих методов позволяет минимизировать потери выхода БАВ.

Повышение стабильности и биодоступности ингредиентов с помощью верно подобранных методов количественного анализа экстрагированных БАВ позволяют соотносить структуру соединения, функциональную активность, реакционную способность. Все эти аспекты играют ключевую роль при создании продуктов функциональной и специализированной направленности и являются перспективными направлениями исследований с учетом непрерывного развития и модернизации методов выделения и анализа биологически активных веществ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Carpena, M., da Pereira, R., Garcia-Perez, P., Otero, P., Soria-Lopez, A., Chamorro, F. et al. (2022). An Overview of Food Bioactive Compounds and Their Properties Chapter in a book: *Membrane Separation of Food Bioactive Ingredients* Springer, Cham, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84643-5_2
2. Ferdes, M. (2018). Antimicrobial compounds from plants. Chapter in a book *Fighting Antimicrobial Resistance*. IAPC Publishing, Zagreb, Croatia, 2018. <https://doi.org/10.5599/obp.15.15>
3. Rawat, P., Singh, Y., Bisht, M., Pal, M. (2023). Modern Analytical Techniques for Extraction, Purification, and Structural Characterization of Microbial Bioactive Compounds. Chapter in a book: *Microbial Bioactive Compounds*. Springer, Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40082-7_5
4. Daliri, E. B., Lee, B. H., Oh, D. H. (2017). Current trends and perspectives of bioactive peptides. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2273–2284. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1319795>
5. Mollica, A., Costante, R., Stefanucci, A., Novellino, E. (2015). Cyclotides: A natural combinatorial peptide library or a bioactive sequence player? *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 30(4), 575–580. <https://doi.org/10.3109/14756366.2014.954108>
6. Rahman, M. M., Rahaman, M. S., Islam, M. R., Rahman, F., Mithi, F. M., Alqahtani, T. et al. (2022). Role of phenolic compounds in human disease: Current knowledge and future prospects. *Molecules*, 27(1), Article 233. <https://doi.org/10.3390/molecules27010233>
7. Zhang, Y., Cai, P., Cheng, G., Zhang, Y. (2022). A brief review of phenolic compounds identified from plants: Their extraction, analysis, and biological activity. *Natural Product Communications*, 17(1), 1–14. <https://doi.org/10.1177/1934578X211069721>
8. Капустин, М. А., Чубарова, А. С., Головач, Т. Н., Цыганков, В. Г., Бондарук, А. М., Курченко, В. П. (2016). Методы получения нанокмешек биологически активных веществ с циклическими олигосахаридами, анализ их физико-химических свойств и использование в пищевом производстве. *Труды Белорусского государственного университета. Серия: физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем*, 11(1), 73–100. [Kapustin, M. A., Chubarova, A. S., Halavatch, T. N., Cigankov, V. G., Bondaruk, A. M., Kurchenko, V. P. (2016). Methods of active compounds with cyclic oligosaccharides nanocomplexes obtaining, analysis of it physical and chemical properties and use in food production. *Proceedings of the Belarusian State University. Series of Physiological, Biochemical and Molecular Biology Sciences*, 11(1), 73–100. (In Russian)]
9. Tanase, C., Coșarcă, S., Muntean, D.-L. (2019). A critical review of phenolic compounds extracted from the bark of woody vascular plants and their potential biological activity. *Molecules*, 24(6), Article 1182. <https://doi.org/10.3390/molecules24061182>
10. Mendonça, E. L. S. S., Xavier, J. A., Fragoso, M. B. T., Silva, M. O., Escodro, P. B., Oliveira, A. C. M. et al. (2024). E-Stilbenes: General chemical and biological aspects, potential pharmacological activity based on the Nrf2 pathway. *Pharmaceuticals*, 17(2), Article 232. <https://doi.org/10.3390/ph17020232>
11. Bonnefont-Rousselot, D. (2016). Resveratrol and cardiovascular diseases. *Nutrients*, 8(5), Article 250. <https://doi.org/10.3390/nu8050250>
12. Braun, C., Dohlen, S., Ilg, Y., Brodtkorb, F., Fischer, B., Heindirk, P. et al. (2017). Antimicrobial activity of intrinsic antimicrobial polymers based on poly((tert-butyl-amino)-methyl-styrene) against selected pathogenic and spoilage microorganisms relevant in meat processing facilities. *Journal of Antimicrobial Agents*, 3(1), Article 136. <https://doi.org/10.4172/2472-1212.1000136>
13. Al-Khayri, J. M., Sahana, G. R., Nagella, P., Joseph, B. V., Alessa, F. M., Al-Mssallem, M. Q. (2022). Flavonoids as potential anti-inflammatory molecules: A review. *Molecules*, 27(9), Article 2901. <https://doi.org/10.3390/molecules27092901>
14. Tian, C., Liu, X., Chang, Y., Wang, R., Lv, T., Cui, C. et al. (2021). Investigation of the anti-inflammatory and antioxidant activities of luteolin, kaempferol, apigenin, and quercetin. *South African Journal of Botany*, 137, 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.10.022>
15. Ku, Y.-S., Ng, M.-S., Cheng, S.-S., Lo, A. W.-Y., Xiao, Z., Shin, T.-S. et al. (2020). Understanding the composition, biosynthesis, accumulation, and transport of flavonoids in crops for the promotion of crops as healthy sources of flavonoids for human consumption. *Nutrients*, 12(6), Article 1717. <https://doi.org/10.3390/nu12061717>
16. Виноградова, М. Г. (2021). УФ-спектральный анализ растительного сырья ландшаща майского. *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*, 2(10), 95–102. [Vinogradova, M. G. (2021). UV-spectral analysis of plant raw materials may lily of the valley. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology»*, 2(10), 95–102. (In Russian)] <https://doi.org/10.46573/2658-7459-2021-95-102>
17. Ražná, K., Nôžková, J., Vargaová, A., Harenčár, L., Bjelková, M. (2021). Biological functions of lignans in plants. *Agriculture*, 67(3), 155–165. <https://doi.org/10.2478/agri-2021-0014>
18. Капустин, М. А., Чубарова, А. С., Лодыгин, А. Д., Ржепаковский, И. В., Дудчик, Н. В., Цыганков, В. Г. и др. (2025). Технология получения нанокмешек куркуминоидов с циклодекстринами, исследование их свойств и биологической активности. *Экспериментальная биология и биотехнология*, 1, 24–39. [Kapustin, M. A., Chubarova, H. S., Lodygin, A. D., Rzhepakovsky, I. V., Dudchik, N. V., Tsygankow V. G. et al. (2025). Technology for nanocomplexes of curcuminoids with cyclodextrins production, investigation of their properties and biological activity. *Experimental Biology and Biotechnology*, 1, 24–39. (In Russian)]
19. Gori, A., Boucherle, B., Rey, A., Rome, M., Fuzzati, N., Peuchmaur, M. (2021). Development of an innovative maceration technique to optimize extraction and phase partition of natural products. *Fitoterapia*, 148, Article 104798. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2020.104798>
20. Hidayat, R., Wulandari, P. (2021). Methods of extraction: Maceration, percolation, and decoction. *Eureka Herba Indonesia*, 2(1), 68–74. <https://doi.org/10.37275/ehi.v2i1.15>
21. Oritz-Kreher, K., Huber, J. (2023). Twelve Essential Oils of the Bible: Ancient Healing Oils and Their Contemporary Uses. Simon and Schuster, 2023.
22. Stratakis, A. C., Koidis, A. (2016). Methods for Extracting Essential Oils. Chapter in a book: *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*. Academic Press, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00004-3>
23. Azmir, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K. M., Mohamed, A., Sahena, F. et al. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 426–436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>
24. Tăbărașu, A.-M., Nenciu, F., Anghelache, D.-N., Vlăduț, V.-N., Găgeanu, I. (2024). Hybrid percolation-ultrasound method for extracting bioactive compounds from *Urtica dioica* and *Salvia officinalis*. *Agriculture*, 14(9), Article 1561. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091561>
25. Дубашинская, Н. В., Хишова, О. М., Шимко, О. М. (2007). Характеристика способов получения экстрактов и их стандартизация (часть II). *Вестник фармации*, 36(2), 70–79. [Dubashinskaya, N. V., Khishova, O. M., Shimko, O. M. (2007). Characteristics of methods of extract production and their standardization (part II). *Pharmacy Herald*, 36(2), 70–79. (In Russian)]
26. Soxhlet, F. (1879). Die gewichtsanalytische Bestimmung des Milchfettes. *Dingler's Polytechnisches Journal*, 232, 461–465. (In German)
27. de Castro, M. D. L., Priego-Capote, F. (2010). Soxhlet extraction: Past and present panacea. *Journal of Chromatography A*, 1217(16), 2383–2389. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.11.027>
28. Naviglio, D., Scarano, P., Ciaravolo, M., Gallo, M. (2019). Rapid solid-liquid dynamic extraction (RSLDE): A powerful and greener alternative to the latest solid-liquid extraction techniques. *Foods*, 8(7), Article 245. <https://doi.org/10.3390/foods8070245>
29. Khan, S., Aslam, R., Makroo, H. (2018). High pressure extraction and its application in the extraction of bioactive compounds: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 42(1), Article e12896. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12896>
30. Herrero, M., Mendiola, J. A., Cifuentes, A., Ibáñez, E. (2010). Supercritical fluid extraction: Recent advances and applications. *Journal of Chromatography A*, 1217(16), 2495–2511. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.12.019>
31. Dumitrah, P. G., Bologa, M. K., Shemyakova, T. D. (2016). Ultrasound-assisted extraction of biologically active substances from tomato seeds. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 52(3), 270–275. <https://doi.org/10.3103/S1068375516030054>

32. Wang, C., Zhang, W., Liao, Y., Ye, J., Xu, F., Wang, Q. (2025). Ginkgo biloba flavonoids: Analysis of functions, regulatory mechanisms, and extraction. *Plant Biology*, 27(6), 962–974. <https://doi.org/10.1111/plb.70054>
33. Routray, W., Orsat, V. (2012). Microwave-assisted extraction of flavonoids: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 5(3), 409–424. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0573-z>
34. Naliyadhara, N., Kumar, A., Girisa, S., Daimary, U. D., Hegde, M., Kunnumakara, A. B. (2022). Pulsed electric field (PEF): Avant-garde extraction escalation technology in food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 122, 238–255. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.019>
35. Sharma, H. P., Patel, H., Sugandha (2017). Enzymatic added extraction and clarification of fruit juices — A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1215–1227. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.977434>
36. Verep, D., Ates, S., Karaoğlu, E. (2023). A review of extraction methods for obtaining bioactive compounds in plant-based raw materials. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 25(3), 492–513.
37. Singh, S., Verma, D. K., Thakur, M., Tripathy, S., Patel, A. R., Shah, N. et al. (2021). Supercritical fluid extraction (SCFE) as green extraction technology for high-value metabolites of algae, its potential trends in food and human health. *Food Research International*, 150(Part A), Article 110746. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110746>
38. Matsumoto, H., Nakamura, Y., Hirayama, M., Yoshiki, Y., Okubo, K. (1999). Antioxidant activity of black currant anthocyanin aglycons and their glycosides measured by chemiluminescence in a neutral pH region and in human plasma. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 50(18), 5034–5037. <https://doi.org/10.1021/jf020292i>
39. Патент № 2554002. Способ количественного определения антоцианов в лекарственном растительном сырье. Куркин, В. А., Рязанова, Т.К., Куркина, А. В., Егорова, А. В. Опубл. 20.06.2015. Бюлл. № 21. [Kurkin, V. A., Ryzanova, T. K., Kurkina, A. V., Egorova, A. V. Method for measuring anthocyanes in crude drugs. Patent RF, no. 2554002, 2015. (In Russian)]
40. Eftekhari, M., Alizadeh, M., Ebrahimi, P. (2012). Evaluation of the total phenolics and quercetin content of foliage in mycorrhizal grape (*Vitis vinifera* L.) varieties and effect of postharvest drying on quercetin yield. *Industrial Crops and Products*, 38, 160–165. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.022>
41. Пономарев, С. В., Зотов, А. Н., Гвоздкова, О. Н., Мальцев, А. Ю., Воронцов, Д. В. (2024). Фитохимические компоненты и промышленное применение виноградных косточек. Краткий обзор мировых исследований. *Эффективное животноводство*, 1(191), 70–73. [Ponomarev, S. V., Zotov, A. N., Gvozdkova, O. N., Maltstv, A. Yu., Voronov, D. V. (2024). Phytochemical components and industrial application of grape seeds. A brief review of world research. *Efficient Animal Husbandry*, 1(191), 70–73. (In Russian)]
42. Houldsworth, A. (2024). Role of oxidative stress in neurodegenerative disorders: A review of reactive oxygen species and prevention by antioxidants. *Brain Communications*, 6(1), Article fcd356. <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcd356>
43. Wang, D., Xiao, H., Lyu, X., Chen, H., Wei, F. (2023). Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review. *Oil Crop Science*, 8(1), 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2023.02.002>
44. Pisoschi, A. M., Pop, A. (2015). The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 97, 55–74. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2015.04.040>
45. Cordiano, R., Di Gioacchino, M., Mangifesta, R., Panzera, C., Gangemi, S., Minciullo, P. L. (2023). Malondialdehyde as a potential oxidative stress marker for allergy-oriented diseases: An update. *Molecules*, 28(16), Article 5979. <https://doi.org/10.3390/molecules28165979>
46. Jiménez-Morales, W. A., Cañizares-Macias, M. D. P., Pedraza-Chaverri, J. (2022). Fast ORAC-SIA method for antioxidant capacity determination in food samples. *Food Chemistry*, 384, Article 132524. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132524>
47. Яшин, А. Я., Веденин, А. Н., Яшин, Я. И., Немзер, Б. В. (2019). Ягоды: химический состав, антиоксидантная активность. Влияние потребления ягод на здоровье человека. *Аналитика*, 9(3), 222–231. [Yashin, A. Ya., Vedenin, A. N., Nemzer, B. V., Yashin, Ya. I. (2019). Berries: Chemical composition, antioxidant activity. Impact of consumption of berries on health of the person. *Analytics*, 9(3), 222–231. (In Russian)] <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2019.9.3.222.230>
48. Apak, R., Gorinstein, S., Böhm, V., Schaich, K. M., Özyürek, M., Güçlü, K. (2013). Methods of measurement and evaluation of natural antioxidant capacity/activity (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 85(5), 957–998. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-12-07-15>
49. Speisky, H., Lopez-Alarcon, C., Gomez, M., Fuentes, J., Sandoval-Acuna, C. (2012). First web-based database on total phenolics and oxygen radical absorbance capacity (ORAC) of fruits produced and consumed within the south Andes region of South America. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(36), 8851–8859. <https://doi.org/10.1021/jf205167k>
50. Atala, E., Vásquez, L., Speisky, H., Lissi, E., López-Alarcón, C. (2009). Ascorbic acid contribution to ORAC values in berry extracts: An evaluation by the ORAC-pyrogallol red methodology. *Food Chemistry*, 113(1), 331–335. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.063>
51. Ninfali, P., Chiarabini, A., Angelino, D. (2014). The ORAC/kcal ratio qualifies nutritional and functional properties of fruit juices, nectars, and fruit drinks. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 65(6), 708–712. <https://doi.org/10.3109/09637486.2014.918591>
52. Atala, E., Aspée, A., Speisky, H., Lissi, E., López-Alarcón, C. (2013). Antioxidant capacity of phenolic compounds in acidic medium: A pyrogallol red-based ORAC (oxygen radical absorbance capacity) assay. *Journal of Food Composition and Analysis*, 32(2), 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.09.007>
53. Yasmin, N., Waleed, A. L.-A., (2021). Recent applications of HPLC in food analysis: A mini review. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 7(5), 01–06. <http://doi.org/10.22161/ijaems.75.1>
54. Esmail, L. A., Jabbar, H. S. (2023). Encapsulation of amaranth CDs at ZIF-7 MOFs as a novel adsorbent for ultrasonic-assisted dispersive nano-solid-phase microextraction and ultrasensitive determination of *Allura red* in food samples. *Microchemical Journal*, 195, Article 109474. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109474>
55. Baruah, B., Gabriel, G. J., Akbashev, M. J., Booher, M. E. (2013). Facile synthesis of silver nanoparticles stabilized by cationic polynorbornenes and their catalytic activity in 4-nitrophenol reduction. *Langmuir*, 29(13), 4225–4234. <https://doi.org/10.1021/la305068p>
56. Malik, A., Nath, M. (2020). Synthesis of Ag/ZIF-7 by immobilization of Ag nanoparticles onto ZIF-7 microcrystals: A heterogeneous catalyst for the reduction of nitroaromatic compounds and organic dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), Article 104547. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104547>
57. Goźiażak, R., Drużyńska, B., Derewiaka, D., Pieczyk, M., Majewska, E., Ciecierska, M. et al. (2022). Verification of the conditions for determination of antioxidant activity by ABTS and DPPH assays — A practical approach. *Molecules*, 27(1), Article 50. <https://doi.org/10.3390/molecules27010050>
61. Re, R., Pelligrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
62. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT — Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
63. Brusotti, G., Cesari, I., Dentamaro, A., Caccialanza, G., Massolini, G. (2014). Isolation and characterization of bioactive compounds from plant resources: The role of analysis in the ethnopharmacological approach. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 87, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2013.03.007>
64. Tzanova, M., Atanasov, V., Yaneva, Z., Ivanova, D., Dinev, T. (2020). Selectivity of current extraction techniques for flavonoids from plant materials. *Processes*, 8(10), Article 1222. <https://doi.org/10.3390/pr8101222>
65. Алексеенко, Е. В., Бакуменко, О. Е., Азарова, М. М., Исабаев, И. Б., Курбанов, М. Т. (2019). Влияние предварительной обработки ягод клюквы на экстракцию антоциановых пигментов, выход сока и его антиоксидантную активность. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 4, 10–27. [Alekseenko, E. V., Bakumenko, O. E., Azarova, M. M., Isabayev, I. B., Kurbanov, M. T. (2019). The influence of pre-processing of berries cranberries on the extraction of anthocyanin pigments, the yield of juice and its antioxidant activity. *Storage and Processing of Farm Products*, 4, 10–27. (In Russian)] <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.200>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Березина Елизавета Александровна — аспирант, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: berezina2508@gmail.com, ORCID: http://orcid.org/0009-0007-2472-0220	Elizaveta A. Berezina , Graduate Student, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: berezina2508@gmail.com, ORCID: http://orcid.org/0009-0007-2472-0220
Кийски Виталина Дмитриевна — аспирант, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: vdkiiiski@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7343-3451	Vitalina D. Kiiski , Graduate Student, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: vdkiiiski@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7343-3451
Казанкин Никита Алексеевич — аспирант, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: nikita300iq@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0001-2046-2523 * автор для контактов	Nikita A. Kazankin , Graduate Student, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: nikita300iq@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0001-2046-2523 * corresponding author
Кригер Ольга Владимировна — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: ovkriger@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1489-0716	Olga V. Kriger , Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Principal Researcher, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: ovkriger@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1489-0716
Яковченко Наталья Владимировна — кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: nviakovchenko@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5188-5916	Natalia V. Iakovchenko , Candidate of Technical Sciences, Docent, Researcher, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: nviakovchenko@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5188-5916
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The authors are equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.