ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2586
https://elibrary.ru/LRQUNI

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Исследование антиоксидантной активности растительного сырья как натурального стабилизатора пищевых продуктов

Л. Р. Варданян[1,*], С. А. Арутюнян[2], Г. О. Торосян[1,3]

[1] *Горисский государственный университет, Горис, Армения*

[2] *Армянский государственный экономический университет, Ереван, Армения*

[3] *Научно-технологический центр органической и фармацевтической химии НАН РА, Ереван, Армения*

Поступила в редакцию: 17.03.2025
Принята после рецензирования: 06.05.2025
Принята к публикации: 01.07.2025

**Л. Р. Варданян: luizavardanyan211@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6627-2293*
С. А. Арутюнян: https://orcid.org/0009-0004-6123-4799
Г. О. Торосян: https://orcid.org/0000-0002-5121-8953

© Л. Р. Варданян, С. А. Арутюнян, Г. О. Торосян, 2025

Аннотация.
Антиоксиданты, защищающие организм от вредного воздействия свободных радикалов и предотвращающие разрушение липидов и других питательных веществ, приобретают все большую популярность. Рост спроса на природные аналоги синтетических антиоксидантов, способных продлить срок хранения продуктов и улучшить здоровье потребителей, обуславливает актуальность изучаемой темы. Цель исследования – изучить антиоксидантные свойства экстрактов плодовых растений семейства *Rosaceae* для оценки их потенциала как натуральных стабилизаторов пищевых продуктов, учитывая влияние региона на активность антиоксидантов.
Объекты исследования – этилацетатные экстракты плодов рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.), боярышника кроваво-красного (*Crataegus sanguinea* Nutt.) и боярышника черного (*Crataegus nigra* Waldst. & Kit.), собранные в южном регионе Республики Армения в период полной спелости. Антиоксидантная активность определялась кинетическим методом на примере модельной реакции инициированного окисления кумола при температуре 348 K с использованием манометрической установки с автоматическим регулированием давления для точной регистрации поглощения кислорода реакционной смесью.
Наибольшей антиоксидантной активностью обладал экстракт плодов боярышника кроваво-красного ($k_7 \approx 5{,}5\times10^{-3}$ л/моль·с), что в 2,5 раза выше показателей рябины обыкновенной ($k_7 \approx 2{,}3\times10^{-3}$ л/моль·с). При этом эффективная концентрация антиоксидантов в экстрактах рябины обыкновенной составила 3,8 моль/л, что несколько выше по сравнению с их концентрацией в боярышнике кроваво-красном (3,5–3,8 моль/л). Экстракт боярышника черного характеризуется более низкими показателями как по содержанию антиоксидантов (0,66 моль/л), так и по антиоксидантной активности ($2{,}4\times10^{-4}$ л/моль·с). Однако продукты окисления антиоксидантов боярышника черного проявляли значительную антиоксидантную активность ($k_{71} = 6{,}48\times10^{2}$ л/моль·с), что почти в три раза выше аналогичного показателя для боярышника кроваво-красного.
На основании полученных результатов этилацетатные экстракты плодов боярышника кроваво-красного и рябины обыкновенной могут быть рекомендованы в качестве эффективных природных антиоксидантов для использования в пищевой промышленности с целью замены синтетических аналогов и увеличения сроков хранения продуктов. Благодаря высокой антиоксидантной активности вторичных продуктов окисления экстракт боярышника черного, несмотря на низкую исходную антиоксидантную активность, перспективен для специфических пищевых систем, где важен пролонгированный защитный эффект.

Ключевые слова. Антиоксиданты, стабилизаторы, растительные экстракты, *Sorbus aucuparia*, *Crataegus sanguinea*, *Crataegus nigra*, окисление кумола, качество, срок хранения

Финансирование. Работа финансировалась за счет средств бюджета Горисского государственного университета. Дополнительных грантов на проведение или руководство данным исследованием получено не было.

Для цитирования: Варданян Л. Р., Арутюнян С. А., Торосян Г. О. Исследование антиоксидантной активности растительного сырья как натурального стабилизатора пищевых продуктов. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 485–495. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2586

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2586
https://elibrary.ru/LRQUNI

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Antioxidant Activity of Plant Raw Materials as Natural Food Stabilizers

Luiza R. Vardanyan[1,*], Siranush H. Harutyunyan[2], Gagik H. Torosyan[1,3]

[1] *Goris State University, Goris, Armenia*

[2] *Armenian State University of Economics, Yerevan, Armenia*

[3] *Scientific and Technological Center of Organic and Pharmaceutical Chemistry, Armenian National Academy of Sciences, Yerevan, Armenia*

Received: 17.03.2025
Revised: 06.05.2025
Accepted: 01.07.2025

**Luiza R. Vardanyan: luizavardanyan211@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6627-2293*
Siranush H. Harutyunyan: https://orcid.org/0009-0004-6123-4799
Gagik H. Torosyan: https://orcid.org/0000-0002-5121-8953

© L.R. Vardanyan, S.H. Harutyunyan, G.H. Torosyan, 2025

Abstract.
Antioxidants protect living organisms from free radicals, as well as prevent the destruction of lipids and other nutrients. Natural alternatives to synthetic antioxidants can extend the shelf-life of food products and improve consumers' health. Extracts of *Rosaceae* berries are known for their antioxidant properties and have a good potential as food stabilizers; however, their efficiency may depend on the region.

The research featured ethyl acetate extracts from mountain ash berries (*Sorbus aucuparia* L.), blood-red hawthorn (*Crataegus sanguinea* Nutt.), and black hawthorn (*Crataegus nigra* Waldst. & Kit.), harvested ripe in the south of the Republic of Armenia. The kinetic modeling of cumene oxidation (348 K) made it possible to determine the antioxidant activity. The experiment involved a manometric installation with automatically regulated pressure that recorded oxygen absorption in the reaction mix.

The blood-red hawthorn extract demonstrated the highest antioxidant activity ($k_7 \approx 5.5\times10^{-3}$ L/mol·s), exceeding the mountain ash indicators ($k_7 \approx 2.3\times10^{-3}$ L/mol·s) by 2.5 times. The effective concentration of antioxidants in the mountain ash extracts was slightly higher (3.8 mol/L) than in the blood-red hawthorn extract (3.5–3.8 mol/L). The black hawthorn extract showed much lower indicators in both antioxidant content (0.66 mol/L) and activity (2.4×10^{-4} L/mol·s). However, the oxidation products of black hawthorn antioxidants exhibited a strong antioxidant activity ($k_{71} = 6.48\times10^{2}$ L/mol·s), almost three times higher than the corresponding indicator for the blood-red hawthorn sample.

The ethyl acetate extracts of blood-red hawthorn (*Crataegus sanguinea* Nutt.) and mountain ash (*Sorbus aucuparia* L.) proved to be effective natural antioxidants that could replace synthetic food stabilizers and extend shelf-life. Despite its low initial antioxidant activity, the black hawthorn extract (*Crataegus nigra* Waldst. & Kit.) might be recommended for specific food systems with prolonged protective effects.

Key words. Antioxidants, stabilizers, plant extracts, *Sorbus aucuparia*, *Crataegus sanguinea*, *Crataegus nigra*, cumene oxidation, quality, shelf life

Funding. This work was funded from the budget of the Goris State University. No additional grants have been received to conduct or direct this particular study.

For citation: Vardanyan LR, Harutyunyan SH, Torosyan GH. Antioxidant Activity of Plant Raw Materials as Natural Food Stabilizers. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3):485–495. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2586

Введение

Антиоксиданты обычно используются в качестве добавок к пище. Их также исследуют на предмет ингибирования различных заболеваний, таких как болезни сердца и рак. Экзогенные типы антиоксидантов (витамины, флавоноиды, антоцианы и некоторые минеральные соединения) получают из природных источников. Кроме того, их производят синтетическим путем, например бутилоксианизол, бутилгидрокситолуол и галлаты. В последнее время популярность приобретают антиоксиданты, созданные специально для защиты организма от вредного воздействия свободных радикалов и предотвращения деградации липидов и других питательных веществ [1].

Окультуренные ягоды – малина, клубника, черная смородина, черника, а также ряд фруктов (например, вишня) являются источниками антиоксидантов, витаминов, минералов и других полезных для здоровья и благополучия человека веществ. Однако существуют также дикорастущие ягоды и фрукты, которые являются ценными продуктами питания благодаря лечебным свойствам. Они содержат фенольные соединения, антиоксиданты и витамины, что делает их перспективными для использования в производстве функциональных продуктов питания. Данная статья посвящена изучению антиоксидантной активности плодов представителей семейства Розоцветных (*Rosaceae*): дикорастущей рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.), боярышника кроваво-красного (*Crataegus sanguinea* Nutt.) и боярышника черного (*Crataegus nigra* Waldst. & Kit.).

Актуальной задачей пищевой промышленности является поиск безопасных и эффективных способов стабилизации качества продуктов питания с помощью антиоксидантных добавок. Нахождение таких стабилизаторов является важнейшей задачей, которая стоит также перед фармацевтической и косметической индустриями [1, 2]. Особый интерес представляют натуральные стабилизаторы растительного происхождения, обладающие антиоксидантной активностью (АОА) [3]. АОА растительного сырья способствует его эффективному применению в пищевой промышленности. Использование растительного сырья в качестве источника природных антиоксидантов позволяет не только увеличить срок хранения пищевых продуктов, но и повысить их пищевую ценность [4]. Возрастающий интерес к антиоксидантам из натуральных источников также обусловлен сопутствующими преимуществами для человеческого здоровья [5]. Антиоксиданты являются важными веществами, которые помогают предотвратить процесс окисления. Окисление относится к химической реакции, способной производить свободные радикалы, в результате чего могут возникнуть цепные реакции, потенциально вызывающие серьезные повреждения клеток организма [6].

Исследования показывают, что растительное сырье содержит широкий спектр биологически активных соединений, включая полифенолы, флавоноиды, аскорбиновую кислоту и токоферолы, которые проявляют выраженные антиоксидантные свойства [7]. Антиоксидантная активность растительного сырья играет важную роль в разработке натуральных стабилизаторов для пищевых продуктов. Эти соединения способны эффективно ингибировать процессы окисления в пищевых системах, предотвращая накопление свободных радикалов и продуктов перекисного окисления липидов [8]. Это особенно важно для сохранения мясо-молочных продуктов и различных масел, подверженных быстрому окислительному повреждению. Такие вещества способствуют снижению прогорклости масел и жиров. Помимо увеличения срока хранения пищевых продуктов, антиоксиданты также могут приносить пользу организму человека. Более того, антиоксиданты продлевают срок годности уже заготовленных продуктов питания, например чипсов и орехов, и сохраняют свежесть и вкусовые качества молочных продуктов.

Замена синтетических антиоксидантов на натуральные компоненты соответствует современным тенденциям создания безопасных пищевых продуктов и отвечает растущему потребительскому спросу на «чистую этикетку» [9]. Однако эффективность применения растительных антиоксидантов в различных пищевых системах требует детального изучения.

В связи с этим особый научный интерес представляют дикорастущие плодовые растения семейства Розоцветные (*Rosaceae*), широко распространенные в умеренных широтах и традиционно используемые в народной медицине. Среди перспективных представителей семейства можно выделить рябину обыкновенную (*S. aucuparia*), боярышник кроваво-красный (*C. sanguinea*) и боярышник черный (*C. nigra*), которые характеризуются богатым химическим составом и высоким содержанием веществ с антиоксидантными свойствами.

Рябина обыкновенная (*S. aucuparia*) – древесное растение семейства Розоцветных (*Rosaceae*), широко распространенное как в диком виде, так и в культурных насаждениях. Встречается в форме дерева или крупного кустарника.

Плоды рябины обыкновенной, несмотря на отсутствие статуса официального лекарственного растительного сырья, активно используются в составе витаминных сборов благодаря богатому комплексу биологически активных веществ. Фитохимический анализ показывает наличие разнообразных групп соединений, включая витамины (С, В, Е), каротиноиды, фенольные соединения (флавоноиды, в том числе антоцианы, фенольные кислоты, дубильные вещества), полисахариды (пектиновые вещества и свободные сахара), цианогенные соединения, органические кислоты, а также широкий спектр микро- и макроэлементов [10, 11].

Особый интерес представляют фенольные соединения плодов рябины (прежде всего проантоцианидины), обуславливающие основные фармакологические эффекты. Исследования демонстрируют, что они обладают антиоксидантной, иммунотропной, противовоспалительной и капилляроукрепляющей активностями [12, 13], а также могут выступать в качестве геропротектива [14].

В отличие от рябины обыкновенной, плоды боярышника кроваво-красного (*C. sanguinea*) являются официальным лекарственным растительным сырьем и включены в Государственную фармакопею Российской Федерации [15]. Широкое применение в медицинской практике обусловлено богатым химическим составом его плодов. Фитохимические исследования показывают наличие различных групп биологически активных веществ: флавоноидов (гиперозид, кверцетин, витексин), проантоцианидинов, тритерпеновых сапони-

нов (кратегусовая и урсоловая кислоты), органических кислот (лимонная, яблочная), витаминов (С, К, Е), каротиноидов, пектиновых веществ и сахаров [16, 17].

Боярышник черный (*C. nigra*) – кустарник или небольшое дерево из Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Его темноокрашенные плоды богаты антоцианами, преимущественно производными цианидина (цианидин-3-галактозид и цианидин-3-глюкозид), что подтверждено хроматографическими исследованиями [18]. Благодаря высокому содержанию антоцианов и других фенольных соединений плоды обладают выраженными антиоксидантными, противовоспалительными и кардиопротекторными свойствами [19].

Богатый химический состав плодов рябины обыкновенной (*S. aucuparia*), боярышника кроваво-красного (*C. sanguinea*) и боярышника черного (*C. nigra*) делает их перспективным сырьем для пищевой промышленности. Они могут быть использованы в производстве функциональных продуктов питания, обогащенных натуральными антиоксидантами и другими биологически активными веществами, а также в качестве натуральных красителей. Кроме того, они могут применяться в молочной, кондитерской, масложировой, пивобезалкогольной и других отраслях пищевой промышленности.

Антиоксиданты существуют в различных формах, каждая из которых выполняет уникальную функцию в организме и действует по своему механизму [1, 5]. Важно отметить, что есть существенное различие между потреблением антиоксидантов в составе натуральных продуктов питания и приемом изолированных антиоксидантных компонентов в виде пищевых добавок [5]. Общий антиоксидантный потенциал пищевых продуктов определяется не просто суммой отдельных компонентов, а их синергетическими и окислительно-восстановительными взаимодействиями между многочисленными типами биологически активных молекул [20]. При оценке антиоксидантной эффективности растительного сырья следует принимать во внимание, что содержание и активность антиоксидантов в одних и тех же фруктах или овощах может существенно варьироваться в зависимости от географического положения, климатических условий, состава почвы, высоты над уровнем моря и других экологических факторов территории их произрастания [21].

Необходимо также учитывать, что многие биоактивные вещества, демонстрирующие высокую эффективность в условиях лабораторных фармакологических экспериментов *in vitro*, могут проявлять значительно меньшую активность или вовсе отличаться по механизму действия при введении в организм человека вследствие особенностей метаболизма, биодоступности и фармакокинетики [22]. Данный феномен обуславливает необходимость комплексного подхода к оценке антиоксидантной активности, включающего не только исследования *in vitro*, но и клинические испытания.

В научной литературе [3, 4, 7] преимущественно представлены данные о содержании антиоксидантных веществ в эфирных маслах и экстрактах из сотен лекарственных растений, ягод, фруктов и овощей, определенные различными физико-химическими методами аналитической химии [9] – вольтамперометрией, жидкостной и газовой хроматографией, масс-спектрометрией, хемилюминесценцией и др. Однако в большинстве исследований приводится лишь суммарное содержание антиоксидантов (хотя в заголовках работ часто указывается «Антиоксидантная активность...»), но не изучается их ингибирующее действие на конкретных моделях окислительных процессов.

Растительные экстракты, особенно эфирные масла, помимо антиоксидантов, содержат более ста различных органических соединений, которые могут по-разному влиять на ингибирующую способность и на процесс окисления в целом. В связи с этим, прежде чем рекомендовать определенный экстракт или эфирное масло в качестве источника антиоксидантов, необходимым и обязательным условием является экспериментальное изучение их ингибирующего действия на конкретных модельных реакциях окисления. Это особенно важно, поскольку компоненты растительных экстрактов могут взаимодействовать между собой, вызывая эффекты синергизма (взаимного усиления) или антагонизма (взаимного ослабления) [10], что существенно модифицирует суммарную антиоксидантную активность растительного сырья по сравнению с теоретическими расчетами.

Цель исследования – комплексное изучение антиоксидантных свойств экстрактов плодов рябины обыкновенной, боярышника кроваво-красного и боярышника черного из южного региона Республики Армения для оценки перспектив их использования в качестве натуральных стабилизаторов пищевых продуктов. Исследования такого рода учитывают факт варьирования биологической активности природных антиоксидантов в зависимости от географического региона их произрастания.

Объекты и методы исследования

В процессе исследования антиоксидантных свойств растительного сырья особое внимание уделялось точности определения количественных параметров, характеризующих как содержание антиоксидантов, так и их активность. Для исследования были выбраны: рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), боярышник кроваво-красный (*Crataegus sanguinea* Nutt.) и боярышник черный (*Crataegus nigra* Waldst. & Kit.). Выбор данных видов растений обусловлен их широким распространением, традиционным использованием в народной медицине и предварительными данными о высоком содержании в них биологически активных веществ с антиоксидантными свойствами. Плоды исследуемых растений собирали в период их полной спелости (сентябрь-октябрь 2024 г.) в утренние часы (с 8 до 10 ч) после высыхания росы в экологически чистых районах южного региона Республики Армения на высоте 1200–1500 м над уровнем моря.

Пробоподготовка растительного сырья. Свежесобранные плоды были подвергнуты первичной обработке: тщательно промывали дистиллированной водой для удаления поверхностных загрязнений и высушивали при комнатной температуре (22–25 °C) в затененном, хорошо проветриваемом помещении. Контроль влажности сырья осуществляли гравиметрическим методом. Высушенное сырье измельчали в лабораторной мельнице до порошкообразного состояния и просеивали через стандартизированное сито с размером ячеек 1 мм для получения однородной фракции, что обеспечивало воспроизводимость результатов при последующей экстракции.

Получение экстрактов. Экстракцию измельченного сырья проводили при комнатной температуре с использованием очищенного этилацетата (≥ 99,5 %, Sigma-Aldrich) в соотношении 20 мл растворителя на 1 г сырья. Выбор этилацетата в качестве экстрагента был обоснован предварительными сравнительными исследованиями эффективности различных растворителей (хлороформ, диэтиловый эфир, этанол, бензол, ацетон) в извлечении антиоксидантных соединений из растительного материала. Экстракцию проводили в течение 24 ч в плоскодонной колбе с периодическим перемешиванием на магнитной мешалке для интенсификации процесса массопереноса. После завершения экстракции смесь фильтровали через бумажный фильтр средней пористости, а полученный фильтрат упаривали до постоянной массы в вакууме при температуре 313 К (40 °C).

Методика определения антиоксидантной активности. Исследование антиоксидантной активности полученных экстрактов проводили кинетическим методом на примере модельной реакции инициированного окисления кумола. Данный метод был выбран как наиболее информативный, позволяющий не только количественно определить эффективное содержание антиоксидантов, но и оценить их способность прерывать цепи окисления в условиях, приближенных к реальным процессам, протекающим в различных пищевых системах.

Для проведения кинетических исследований была использована манометрическая установка с автоматическим регулированием давления, позволяющая с высокой точностью регистрировать количество поглощенного кислорода реакционной смесью. Установка состоит из реактора объемом 10 мл, термостата с точностью поддержания температуры ± 0,1 °C, системы манометрических трубок, градуированной бюреты и электролизера. Принцип работы установки основан на компенсации уменьшения давления в системе, вызванного поглощением кислорода в процессе окисления, путем электролитического выделения эквивалентного количества газа.

При анализе антиоксидантного действия экстрактов принимали во внимание, что растительные экстракты представляют собой многокомпонентные системы, содержащие комплекс биологически активных веществ с различными антиоксидантными свойствами. В таких системах могут проявляться как синергетические, так и антагонистические эффекты между различными компонентами, что оказывает влияние на суммарную антиоксидантную активность. Так как количественная оценка вклада отдельных компонентов и их взаимного влияния представляет значительную методологическую сложность, в данном исследовании определяли эффективную (суммарную) антиоксидантную активность экстрактов, которая отражает интегральный результат действия всех антиоксидантных компонентов с учетом их возможных взаимодействий.

Подготовка и очистка реактивов. Перед проведением измерений все используемые реактивы подвергали тщательной очистке. Кумол (изопропилбензол, х.ч.) очищали многократной промывкой концентрированной серной кислотой (96 %) в соотношении 1:7 по объему до прекращения окрашивания кислотного слоя. После чего трехкратно промывали дистиллированной водой, затем 5 % раствором NaOH. Окончательно промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции (pH = 7). Очищенный кумол высушивали над безводным хлоридом кальция и перегоняли над металлическим натрием в атмосфере азота. Чистоту полученного кумола контролировали по отсутствию периодов индукции на кинетических кривых его окисления, а также по совпадению температуры кипения (419 К при 85 кПа) и показателя преломления 1,4918 с литературными данными.

В качестве растворителя использовали хлорбензол, который подвергали аналогичной процедуре очистки. Инициатором радикальных процессов служил азо-ди-изо-бутиронитрил (98 %, Sigma-Aldrich), дополнительно очищенный многократной перекристаллизацией из этанольного раствора.

Процедура измерений и обработка данных. Определение антиоксидантной активности проводили следующим образом: реактор объемом 5 мл заполняли реакционной смесью, содержащей кумол (2,87 моль/л), инициатор азо-ди-изо-бутиронитрила в хлорбензоле и исследуемый экстракт в различных концентрациях. Реактор охлаждали до 273 К, после чего из реакционной смеси и системы откачивали воздух с помощью форвакуумного насоса и заполняли кислородом. Эту операцию повторяли трижды для полного замещения воздуха кислородом. Затем реактор помещали в термостат с заданной температурой (348 К) и включали механическое перемешивание с частотой 8–10 колебаний в секунду, что обеспечивало протекание реакции в кинетическом режиме.

За ходом реакции следили, регистрируя объем поглощенного кислорода в зависимости от времени. Скорость поглощения кислорода (V, моль/л·с) определяли по формуле:

$$V = \left(\frac{A}{T}\right) \times \mathrm{tg}\alpha$$

где T – температура бюреты, К; tgα – тангенс угла наклона кинетической кривой поглощения кислорода, мм/мин; A – постоянная используемой манометрической установки ($2{,}65\times10^{-4}$), определяемая как:

$$A = \frac{P\pi d^2}{4\times 60\times RTV}$$

где P – атмосферное давление, Па; R = 8,31 Дж/моль·К; d – диаметр бюреты (3,1 мм); V – объем реакционной смеси, мл.

Количественное определение антиоксидантов в экстрактах проводилось на основе наблюдаемых периодов индукции на кинетических кривых поглощения кислорода с применением уравнения (1)

$$\tau = \frac{m}{V_i} = \frac{f\left[In\mathrm{H}\right]_0}{V_i} \qquad (1)$$

где $[In\mathrm{H}]_0$ – содержание антиоксидантов в данной навеске экстракта; m – содержание экстракта, мг; V_i – скорость инициирования; f – стехиометрический коэффициент ингибирования (число радикалов, обрывающихся на одной молекуле ингибитора). Поскольку в химическом составе исследованные экстракты имеют несколько антиоксидантов, то параметры f невозможно определить. По этой причине в наших расчетах приведены не абсолютные, а эффективные содержания антиоксидантов.

Критерии оценки антиоксидантных свойств. Антиоксидантное действие экстрактов растений оценивали по трем ключевым параметрам:

1. Содержание антиоксидантов – данный показатель имеет первостепенное значение, поскольку более высокое содержание антиоксидантов в исследуемом экстракте обеспечивает более продолжительное время торможения радикального процесса окисления. Количественное содержание антиоксидантов напрямую влияет на длительность защитного эффекта и определяет потенциальную возможность использования экстракта в качестве пищевого стабилизатора.

2. Емкость антиоксидантов характеризует число радикалов, обрывающихся на одной молекуле антиоксиданта. Для сложных экстрактов определение данного параметра представляет значительную методологическую сложность, поскольку экстракты, как правило, содержат в своем химическом составе два и более антиоксидантных вещества, между которыми могут возникать сложные взаимодействия, приводящие как к синергетическому усилению (синергизму), так и к взаимному ослаблению действия (антагонизму) [10]. Поэтому для растительных экстрактов данный параметр не определяли.

3. Антиоксидантная активность (АОА) – количественно характеризуется константой скорости реакции k_7, отражающей способность вещества взаимодействовать со свободными радикалами и прерывать цепь окисления. Для растительных экстрактов определяемая антиоксидантная активность является эффективной величиной, поскольку в реакции участвует не одно индивидуальное соединение-ингибитор, а комплекс антиоксидантных соединений различной природы.

В работе приведены также результаты расчетов антиоксидантных активностей. АОА ингибиторов в реакциях окисления характеризуется константой скорости реакции линейного обрыва цепи:

$$\text{I. } RO_2 + In\mathrm{H} \xrightarrow{k_7} \mathrm{ROOH} + In$$

При расчетах k_7 пользовались уравнением (2) [16]:

$$\left[O_2\right] = -\frac{k_2}{k_7}\left[\mathrm{RH}\right] ln\left(1-\frac{T}{\tau}\right) \qquad (2)$$

где k_2 – константа скорости реакции продолжения цепи

$$\text{II. } RO_2 + \mathrm{RH} \xrightarrow{k_2} \mathrm{ROOH} + R$$

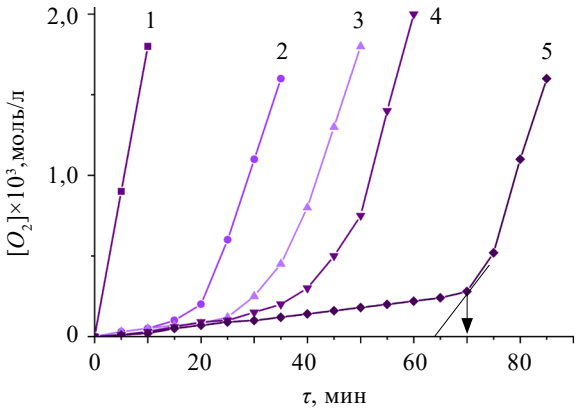
где [RH] – концентрация окисляющегося вещества-кумола, $[O_2]$ – количество поглощенного кислорода за время периода индукции $T < \tau$. Период индукции определяется графически на кинетических кривых поглощения кислорода по координате точки пересечения двух прямых, для которых $\mathrm{tg}\alpha_1 = 2\mathrm{tg}\alpha_2$ или $V\infty = 2V$. $V\infty$ – скорость поглощения кислорода после выхода из индукционного периода, $f[In\mathrm{H}]_0$ в присутствии ингибитора.

При анализе антиоксидантного действия экстрактов учитывали возможность проявления как синергетических, так и антагонистических эффектов между различными компонентами, что отражается на эффективной константе скорости реакции обрыва цепей окисления.

Результаты и их обсуждение

Полученные экстракты представляли собой вязкие субстанции от светло-желтого до темно-коричневого цвета с характерным ароматом. Выход экстрактивных веществ составил: для рябины обыкновенной – 7,8 ± 0,3 %, для боярышника кроваво-красного – 6,5 ± 0,2 %, для боярышника черного – 5,9 ± 0,3 % от массы воздушно-сухого сырья. Этилацетатные экстракты избирательно извлекают среднеполярные соединения, включая фенольные вещества, флавоноиды и некоторые формы витаминов, что делает их перспективными объектами для изучения антиоксидантной активности.

При исследовании процесса окисления кумола в присутствии анализируемых экстрактов были зарегистрированы кинетические кривые поглощения кислорода с ярко выраженными индукционными периодами (рис. 1). Присутствие таких индукционных периодов указывает на антиоксидантную активность компонентов экстрактов. Математическая обработка полученных индукционных периодов согласно уравнению (1) (рис. 2) позволила рассчитать эффективную концентрацию антиоксидантов ($f.[In\mathrm{H}]_0$) в изученных экстрактах. Полученные результаты приведены в таблице.



1 – без добавления экстрактов;
2 – рябина обыкновенная 0,373 мг;
3 – боярышник черный 2,692 мг; 4 – боярышник кроваво-красный 0,789 мг; 5 – боярышник кроваво-красный 1,31 мг

Рисунок 1. Кинетические кривые поглощения кислорода при окислении кумола в отсутствие и в присутствии экстрактов плодов (V_i = 1,25×10^{-7} моль/л·с, T = 348 K)

Figure 1. Kinetic curves of oxygen absorption during cumene oxidation with and without berry extracts (V_i = 1.25×10^{-7} mol/L·s, T = 348 K)

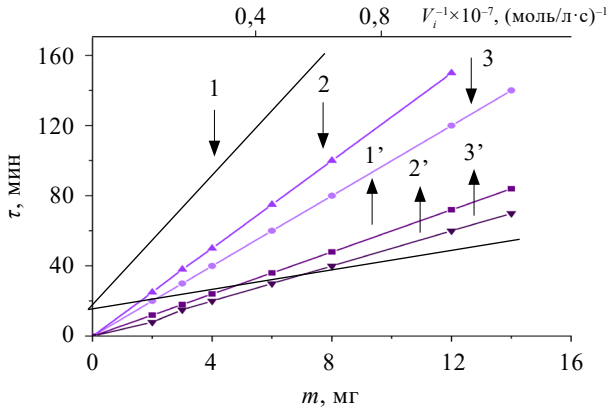


Рисунок 2. Зависимость периодов индукции поглощения кислорода при окислении кумола: от содержания экстрактов (V_i = 1,25×10^{-7} моль/л·с) из плодов боярышника кроваво-красного (1), боярышника черного (2) и рябины обыкновенной (3); от обратной величины скорости инициирования (1’; 2’; 3’ $m_{экстр}$ = 1,29 мг, T = 348 K)

Figure 2. Dependence of induction time of oxygen absorption during cumene oxidation: on the content of extracts (V_i = 1.25×10^{-7} mol/L·s) of blood-red hawthorn (1), black hawthorn (2), and mountain ash (3); on the reciprocal value of the initiation rate (1’; 2’; 3’ $m_{extract}$ = 1.29 mg, T = 348 K)

Таблица. Содержание и кинетические параметры окисления антиоксидантов экстрактов плодов рябины обыкновенной, боярышника кроваво-красного и боярышника черного (348 K)

Table. Content and kinetic parameters of oxidation of antioxidants in extracts of mountain ash, blood-red hawthorn, and black hawthorn (348 K)

Плоды	$V_i\times10^7$, моль/л·с	m, мг	τ, мин	$f[InH]^a\times10^4$, моль/л	$V\times10^6$, моль/л·с	$k_7\times10^4$, л/моль·с	$k_{71}\times10^{-2}$, л/моль·с
Рябина обыкновенная	1,25	0	0	0	3,00	–	–
	1,25	0,201	10	3,81	1,94	23,02	–
	1,25	0,373	19	3,82	1,78	23,54	–
	1,25	0.548	29	3,91	2,56	22,89	–
	1,25	0,654	33	3,79	1,84	22,98	–
Боярышник кроваво-красный	1,25	0,452	21	3,5	1,81	55,00	2,99
	1,25	0,563	26	3,42	2,30	55,03	2,97
	1,25	0,789	40	3,8	2,58	54,89	2,96
	1,25	1,311	62	3,55	2,79	56,12	2,98
Боярышник черный	1,25	2,692	24	0,67	1,64	2,41	6,44
	1,25	2,255	20	0,66	2,21	2,52	6,48
	1,25	1,125	10	0,65	2,23	2,38	6,46

В таблице приведены также значения параметров k_7, характеризующие АОА масел. Значения k_7 определяли, спрямляя экспериментальные данные поглощения кислорода за время индукционного периода в координатах уравнения (2). При этом учитывали, что для кумола k_2 = 4,677×10^{6}exp(–9800/RT) л/моль·с [24].

Анализ АОА исследуемых экстрактов показал существенные различия между изучаемыми видами растительного сырья. Наибольшую антиоксидантную активность продемонстрировал экстракт плодов боярышника кроваво-красного, константа скорости реакции линейного обрыва цепи (k_7) которого составила около 5,5×10^{-3} л/моль·с, что в 2,5 раза превышает показатели рябины обыкновенной (2,3×10^{-3} л/моль·с). При этом эффективная концентрация антиоксидантов в экстрактах рябины обыкновенной оказалась несколько выше (3,8 моль/л) по сравнению с боярышником кроваво-красным (3,5–3,8 моль/л).

Экстракт плодов боярышника черного характеризуется значительно более низкими показателями

как по содержанию антиоксидантов (0,66 моль/л), так и по антиоксидантной активности (2,410–4 л/моль·с). Это может быть связано с особенностями химического состава рассматриваемого растения, а также с возможным влиянием условий произрастания на накопление биологически активных веществ.

Исследование влияния концентрации экстрактов на их антиоксидантную активность показало наличие нелинейной зависимости для боярышника кроваво-красного при концентрациях выше 1,5 мг/мл. Это может быть связано с проявлением эффекта насыщения системы антиоксидантами или с возникновением агрегации компонентов экстракта при высоких концентрациях. Данное наблюдение имеет важное практическое значение для определения оптимальных дозировок экстрактов при их применении в пищевых системах. Для рябины обыкновенной зависимость антиоксидантной активности от концентрации носила линейный характер во всем исследованном диапазоне концентраций (0,2–1,0 мг/мл), что указывает на отсутствие взаимодействий между компонентами экстракта, способных повлиять на антиоксидантные свойства.

Полученные результаты по антиоксидантной активности этилацетатных экстрактов согласуются с общими тенденциями, описанными в исследованиях [7, 8], однако абсолютные значения констант скорости реакции линейного обрыва цепи (k_7) для экстрактов боярышника кроваво-красного оказались значительно выше средних показателей, характерных для растительных экстрактов. Это подтверждает высокий потенциал изученных экстрактов в качестве натуральных антиоксидантов. Особый интерес представляет сравнительно высокая антиоксидантная активность экстрактов рябины обыкновенной, которая, согласно данным [12, 13], может варьироваться в зависимости от условий произрастания и методов экстракции.

Изучение механизмов антиоксидантного действия экстрактов показало, что для боярышника кроваво-красного характерен преимущественно прямой механизм взаимодействия с пероксильными радикалами, о чем свидетельствует высокое значение константы скорости реакции k_7. В то же время для экстрактов рябины обыкновенной важную роль играет не только прямое взаимодействие с радикалами, но и хелатирование ионов металлов переменной валентности, способных катализировать процессы окисления. Это подтверждается наличием в составе экстрактов рябины соединений с орто-дигидроксильными группами (катехиновой структурой), обладающих выраженной хелатирующей способностью [12].

Анализ кинетических кривых показал интересную закономерность: в присутствии исследованных экстрактов (за исключением экстрактов из рябины обыкновенной) после завершения индукционных периодов скорость поглощения кислорода оставалась значительно ниже, чем при безингибированном окислении кумола. Это наглядно демонстрируют различия в тангенсах углов наклона кинетических кривых на рисунке 1, где угол наклона кривой неингибированного окисления (кривая 1) существенно больше углов наклона кривых, соответствующих окислению в присутствии экстрактов боярышника кроваво-красного и боярышника черного после выхода из индукционных периодов. Такое явление визуально очевидно даже без проведения количественных расчетов и свидетельствует о продолжающемся антиоксидантном действии вследствие израсходования первичных антиоксидантов.

Этот факт объясняется антиоксидантным свойством продуктов окисления (Q) исходных антиоксидантов, находящихся в экстрактах. Продукты Q образуются в результате реакции:

III. $RO_2 + In \xrightarrow{k_8} Q +$ молекулярные продукты

При этом продукты Q отличаются от исходных антиоксидантов тем, что в их присутствии на кинетических кривых не обнаруживаются индукционные периоды, т. е. в их присутствии обрыв цепи осуществляется как квадратично:

IV. $RO_2 + RO_2 \xrightarrow{k_6}$ молекулярные продукты

так и линейно:

V. $RO_2 + Q \xrightarrow{k_{71}} Q +$ молекулярные продукты

VI. $RO_2 + Q \xrightarrow{k_{81}}$ молекулярные продукты

В этих условиях скорость окисления кумола после выхода из индукционного периода описывается уравнением (3):

$$V = k_2 [RH] \frac{k_{71}[Q]}{k_6} \left[\left(1 + \frac{k_6 V_i}{k_{71}^2 [Q]^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (3)$$

В отсутствии антиоксидантов скорость окисления кумола (V_0) равна:

$$V_0 = \frac{k_2}{\sqrt{k_6}} [\mathrm{RH}] \sqrt{V_i} \quad (4)$$

Так, преобразуя уравнение (3), получим:

$$F = \frac{V_0}{V} - \frac{V}{V_0} = \frac{k_{71}[Q]}{\sqrt{k_6 V_i}} \quad (5)$$

где k_6 и k_{71} – константы скорости реакций (IV) и (V), V_i – скорость инициирования. Здесь k_{71} характеризует АОА продуктов Q.

На рисунках 3 и 4 экспериментальные данные спрямляются в координатах уравнения (5). Предполагая, что концентрация Q равна исходной концентрации антиоксидантов в данном экстракте, т. е. $[Q] = f[In\mathrm{H}]$ из тангенса углов прямых (1') и (2'), вычислили значение k_{71} (с учетом, что кумол $k_6 = 4{,}74 \times 10^5 \exp(-1800/RT)$ [11]). Результаты приведены в таблице.

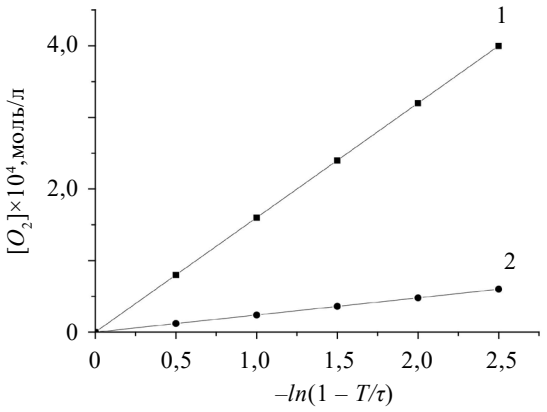


Рисунок 3. Зависимость концентрации поглощенного кислорода от параметра $ln(1 - T/\tau)$ за время периода индукции при окислении кумола в присутствии экстрактов из плодов (1) боярышника черного и (2) боярышника кроваво-красного ($V_i = 1{,}25\times10^{-7}$ моль/л·с, $T = 348$ K)

Figure 3. Effect of $ln(1 - T/\tau)$ on the concentration of oxygen absorbed during the induction of cumene oxidation with extracts of (1) black hawthorn and (2) blood-red hawthorn ($V_i = 1.25\times10^{-7}$ mol/L·s, $T = 348$ K)

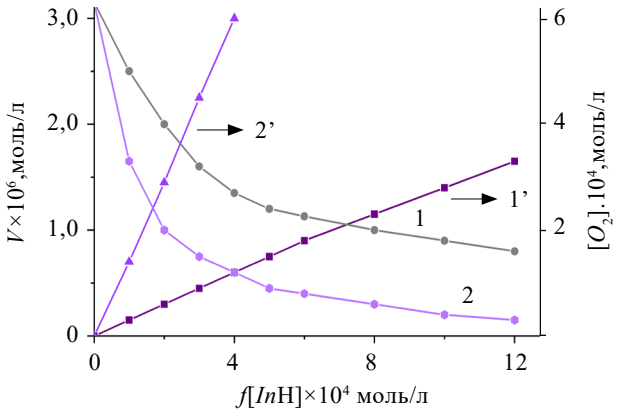


Рисунок 4. Зависимость скорости окисления кумола после выхода из периодов индукции от концентрации антиоксидантов, содержащихся в экстрактах из плодов боярышника черного (1) и боярышника кроваво-красного (2) и их спрямление (1', 2') в координатах уравнения (3) ($V_i = 1{,}25\times10^{-7}$ моль/л·с, $T = 348$ K)

Figure 4. Correlation between the oxidation rate of cumene after the induction periods on the concentration of antioxidants in extracts of black hawthorn (1) and blood-red hawthorn (2), and their straightening (1', 2') in Eq. 3 ($V_i = 1.25\times10^{-7}$ mol/L·s, $T = 348$ K)

Из данных таблицы следует, что из продуктов окисления исследованных экстрактов наибольшую АОА проявляют экстракты из плодов боярышника черного ($k_{71} = 6{,}48\times10^2$ л/моль·с), что почти в три раза больше АОА плодов боярышника кроваво-красного.

Обнаруженное явление антиоксидантной активности продуктов окисления исходных антиоксидантов представляет интерес с точки зрения прикладного использования данных экстрактов. На основании анализа кинетических данных (рис. 3 и 4) можно предположить, что вклад вторичных антиоксидантов в общую антиоксидантную активность экстракта боярышника черного может быть значительным при длительном хранении стабилизированных продуктов. Это предположение основано на сравнении константы скорости реакции продуктов окисления антиоксидантов боярышника черного ($k_{71} = 6{,}48\times10^2$ л/моль·с) с аналогичным показателем для боярышника кроваво-красного. Такое соотношение активностей теоретически может обеспечивать каскадный эффект антиоксидантной защиты, когда первичные антиоксиданты, окисляясь, образуют вторичные антиоксиданты, продолжающие защитное действие. Однако точная количественная оценка данного эффекта в реальных пищевых системах требует дополнительных экспериментальных исследований с моделированием условий длительного хранения.

Выводы

Этилацетатные экстракты исследованных плодов семейства Розоцветные (*Rosaceae*) проявляют выраженную антиоксидантную активность в модельной реакции окисления кумола, что подтверждается наличием периодов индукции на кинетических кривых поглощения кислорода. Разработанная методика позволяет комплексно оценивать антиоксидантные свойства растительных экстрактов и может быть рекомендована для скрининга потенциальных природных стабилизаторов пищевых продуктов. После выхода из индукционных периодов кинетические кривые для некоторых экстрактов не стремятся к кривым безингибированного окисления, что указывает на антиоксидантную активность вторичных продуктов окисления и обеспечивает пролонгированное защитное действие.

Наибольшей антиоксидантной активностью обладает экстракт плодов боярышника кроваво-красного ($k_7 \approx 5{,}5\times10^{-3}$ л/моль·с), что делает его наиболее перспективным источником природных антиоксидантов для пищевой промышленности. Высокое значение константы скорости реакции линейного обрыва цепи свидетельствует о способности компонентов данного экстракта эффективно нейтрализовать свободные радикалы на начальных стадиях окислительных процессов. Анализ химического состава показывает, что высокая антиоксидантная активность боярышника кроваво-красного обусловлена наличием в нем флавоноидов (гиперозид, кверцетин, витексин), проантоцианидинов и других фенольных соединений, способных быстро реагировать с пероксильными радикалами.

Экстракт плодов рябины обыкновенной характеризуется стабильно высоким содержанием антиоксидантов (3,8 моль/л) при умеренной антиоксидантной активности ($k_7 \approx 2{,}3\times10^{-3}$ л/моль·с). Данное сочетание параметров обеспечивает продолжительный период защиты от окисления, что особенно важно для пищевых

продуктов с длительным сроком хранения. Богатый состав биологически активных веществ рябины обыкновенной, включающий витамины (С, Е), каротиноиды, фенольные соединения и проантоцианидины, обеспечивает комплексное антиоксидантное действие, способствуя не только увеличению срока хранения продуктов, но и повышению их пищевой ценности.

Экстракт плодов боярышника черного существенно уступает другим исследованным видам как по содержанию антиоксидантов (0,66 моль/л), так и по антиоксидантной активности ($2{,}4\times10^{-4}$ л/моль·с). Однако установлено, что продукты окисления антиоксидантов боярышника черного проявляют значительную антиоксидантную активность ($k_{71} = 6{,}48\times10^{2}$ л/моль·с), что почти в три раза превышает аналогичный показатель для боярышника кроваво-красного. Это открывает возможность использования данного экстракта в специализированных пищевых системах, где важна антиоксидантная активность вторичных продуктов, формирующихся в процессе хранения.

Результаты исследования позволяют обоснованно рекомендовать этилацетатные экстракты плодов боярышника кроваво-красного и рябины обыкновенной в качестве эффективных природных антиоксидантов для использования в пищевой промышленности с целью замены синтетических аналогов и увеличения сроков хранения продуктов.

Высокая антиоксидантная активность боярышника кроваво-красного ($k_7 \approx 5{,}5\times10^{-3}$ л/моль·с) позволяет рекомендовать экстракты из него для стабилизации пищевых систем, особенно подверженных окислительной порче. Стабильно высокое содержание антиоксидантов в экстрактах рябины обыкновенной (3,8 моль/л) делает их перспективными для длительной защиты пищевых продуктов от окисления.

Полученные экспериментальные данные создают научно-практическую основу для разработки новых технологических решений по использованию растительных экстрактов в качестве натуральных стабилизаторов пищевых продуктов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение синергетического действия комбинаций различных растительных экстрактов, а также на разработку технологий их применения в конкретных пищевых системах.

Антиоксидантная активность растительного сырья служит эффективным и естественным стабилизатором для пищевых продуктов. Используя растительные антиоксиданты, пищевая промышленность может сократить потребность в синтетических консервантах, одновременно улучшая пищевой профиль продуктов. Широкая доступность и разнообразие богатых антиоксидантами растений делает их привлекательным вариантом для улучшения срока годности и качества продуктов питания, а также предлагает потенциальную пользу для здоровья потребителей. Последующие исследования новых растительных антиоксидантов и их применения продолжат играть ключевую роль в продвижении методов консервирования продуктов питания.

Критерии авторства

Л. Р. Варданян – концептуализация исследования, проведение экспериментальных исследований, обработка результатов, подготовка и редактирование статьи. С. А. Арутюнян – подготовка исходных веществ, проведение экспериментальных исследований. Г. О. Торосян – концептуализация исследования, обработка результатов, подготовка и редактирование статьи. Все авторы ознакомились и согласились с опубликованной версией рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

L.R. Vardanyan developed the research concept, conducted the experiments, processed the results, and drafted the manuscript. S.A. Harutyunyan prepared the raw materials and conducted the experiments. G.O. Torosyan developed the research concept, processed the results, and drafted the manuscript. All authors agreed to the published version of the manuscript.

Conflict of interest

The authors declared no potential conflict of interest regarding the research, authorship, and / or publication of this article.

Список литературы / References

1. Sharifi-Rad J, Kumar NVA, Zucca P, Varoni EM, Dini L, *et al.* Lifestyle, oxidative stress, and antioxidants: Back and forth in the pathophysiology of chronic diseases. Frontiers in Physiology. 2020;11:694. https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00694

2. Тринеева О. В. Методы определения антиоксидантной активности объектов растительного и синтетического происхождения в фармации (обзор). Разработка и регистрация лекарственных средств. 2017. № 4. С. 180–197. [Trineeva OV. Methods of determination of antioxidant activity of plant and synthetic origins in pharmacy (Review). Drug development & registration. 2017;(4):180–197. (In Russ.)]. https://elibrary.ru/ZTWVEX

3. Pisoschi AM, Pop A. The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. European Journal of Medicinal Chemistry. 2015;97:55–74. https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2015.04.040

4. Taghvaei M, Jafari SM. Application and stability of natural antioxidants in edible oils in order to substitute synthetic additives. Journal of Food Science and Technology. 2015;52(3):1272–1282. https://doi.org/10.1007/s13197-013-1080-1

5. Rahaman MM, Hossain R, Herrera-Bravo J, Islam MT, Atolani O, *et al.* Natural antioxidants from some fruits, seeds, foods, natural products, and associated health benefits: An update. Food Science & Nutrition. 2023;11(4):1657–1670. https://doi.org/10.1002/fsn3.3217

6. Mititelu RR, Pădureanu R, Băcănoiu M, Pădureanu V, Docea AO, *et al.* Inflammatory and oxidative stress markers–Mirror tools in rheumatoid arthritis. Biomedicines. 2020;8(5):125. https://doi.org/10.3390/biomedicines8050125

7. Das N. A review on efficacy of spices and herbs as per *Ayurveda* and their role as a potent antioxidant and antimicrobial agents. Annals of Ayurvedic Medicine. 2022;11(4):349–363. https://doi.org/10.5455/AAM.18694

8. Lourenço SC, Moldão-Martins M, Alves VD. Antioxidants of natural plant origins: From sources to food industry applications. Molecules. 2019;24(22):4132. https://doi.org/10.3390/molecules24224132

9. Shahidi F, Ambigaipalan P. Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects – A review. Journal of Functional Foods. 2015;18(Part B):820–897.

10. Андреева В. Ю., Исайкина Н. В., Цыбукова Т. Н., Петрова Е. В. Изучение элементного состава плодов калины обыкновенной и рябины обыкновенной различными современными методами. Химия растительного сырья. 2016. № 1. С. 177–180. [Andreeva VYu, Isaykina NV, Tsybukova TN, Petrova EV. The study of the elemental composition of fruits of *Viburnum opulus* L. and *Sorbus aucuparia* L. various modern methods. Khimiya Rastitel'nogo Syr'ja. 2016;(1):177–180. (In Russ.)] https://doi.org/10.14258/jcprm.201601893

11. Исайкина Н. В., Калинкина Г. И., Андреева В. Ю., Шерстобоев Е. Ю., Масная Н. В. и др. Рябина обыкновенная: определение антоцианов в плодах. Фармация. 2015. № 1. С. 19–22. [Isaykina NV, Kalinkina GI, Andreeva VYu, Sherstoboev EYu, Masnaya NV, *et al.* Rowan (*Sorbus aucuparia* L.): Determination of antocyans in the berries. Farmatsiya. 2015;(1):19–22. (In Russ.)]. https://elibrary.ru/TLUINN

12. Rutkowska M, Kołodziejczyk-Czepas J, Olszewska MA. The effects of *Sorbus aucuparia* L. fruit extracts on oxidative/Nitrative modifications of human fibrinogen, impact on enzymatic properties of thrombin, and hyaluronidase activity in vitro. Antioxidants. 2021;10(12):2009. https://doi.org/10.3390/antiox10122009

13. Aurori M, Niculae M, Hanganu D, Pall E, Cenariu M, *et al.* The Antioxidant, antibacterial and cell-protective properties of bioactive compounds extracted from rowanberry (*Sorbus aucuparia* L.) fruits *in vitro*. Plants. 2024;13(4):538. https://doi.org/10.3390/plants13040538

14. Platonova EYu, Golubev DA, Zemskaya NV, Shevchenko OG, Patov SA, *et al.* The antioxidant and geroprotective properties of an extract of mountain ash (*Sorbus aucuparia* L.) fruits. Molecular Biology. 2023;57(6):979–994.

15. Государственная фармакопея Российской Федерации XV издания. Институт фармакопеи и стандартизации в сфере обращения лекарственных средств. [State Pharmacopoeia of the Russian Federation edition XV. Institute of Pharmacopoeia and Medicinal Product Standardisation. [cited 2025 Mar 16] (In Russ.)] Available from: https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15/

16. Özderin S. Chemical properties, antioxidant, and antimicrobial activities of fruit extracts of *Crataegus monogyna* var. *odemisii*. BioResources. 2024;19(1):1542–1557.

17. Ülger TT, Oçkun MA, Guzelmeric E, Sen NB, Sipahi H, *et al.* Comprehensive analysis of the chemical and bioactivity profiles of endemic *Crataegus turcicus* dönmez in comparison with other *Crataegus* species. Molecules. 2023;28(18):6520. https://doi.org/10.3390/molecules28186520

18. Дейнека В. И., Макаревич С. Л., Дейнека Л. А., Фирсов Г. А., Сорокопудов В. Н. и др. Антоцианы плодов некоторых видов боярышника (*Crataegus* L., *Rosaceae*). Химия растительного сырья. 2014. № 4. С. 123–128. [Deyneka VI, Makarevich SL, Deyneka LA, Firsov GA, Sorokopudov VN, *et al.* Anthocyanins of some hawthorn species (*Crataegus* L., *Rosaceae*) fruits. Khimiya Rastitel'nogo Syr'ja. 2014;(4):123–128. (In Russ.)]. https://doi.org/10.14258/jcprm.1401119

19. Буданцев А. Л., Беленовская Л. М., Битюкова Н. В. Компонентный состав и биологическая активность *Crataegus pinnatifida* (*Rosaceae*) (обзор). Химия растительного сырья. 2020. № 4. С. 31–58. [Budantsev AL, Belenovskaya LM, Bityukova NV. Component composition and biological activity of *Crataegus pinnatifida* (*Rosaceae*) (review). Khimiya Rastitel'nogo Syr'ja. 2020;(4):31–58. (In Russ.)] https://journal.asu.ru/cw/article/view/6612

20. Butnariu M, Quispe C, Herrera-Bravo J, Sharifi-Rad J, Singh L, *et al.* The pharmacological activities of *Crocus sativus* L.: A review based on the mechanisms and therapeutic opportunities of its phytoconstituents. Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2022;8214821. https://doi.org/10.1155/2022/8214821

21. Stabnikova O, Stabnikov V, Parades-López O. Fruit of wild-crown shrubs for health nutrition. Plant Foods for Human Nutrition. 2024;79(1):20–37. https://doi.org/10.1007/s11130-024-01144-3

22. Akhtar A. The Flaws and human harms of animal experimentation. Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics. 2015; 24(4):407–419. https://doi.org/10.1017/S0963180115000079

23. Akimoto H. Homogeneous elementary reactions in the atmosphere and rate constants. Atmospheric Reaction Chemistry. Tokyo: Springer; 2016. pp. 165–238. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55870-5_5

24. Atkins P, de Paula J. Atkins' physical chemistry. NY: Oxford University Press, 2018. 507 p.