

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2619>
<https://elibrary.ru/XDHTZS>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Оценка антиоксидантной активности листьев деревьев для дальнейшего использования в качестве экологичных консервантов



Л. Р. Варданян^{1,*}, Н. С. Торосян²,
Н. Р. Оганесян³, Г. О. Торосян^{1,4}

¹ Горисский государственный университет, Горис, Армения

² Центр Эколого-ноосферных исследований НАН РА (Экоцентр ГНКО), Ереван, Армения

³ Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

⁴ Научно-технологический центр органической и фармацевтической химии НАН РА, Ереван, Армения

Поступила в редакцию: 29.05.2025

Принята после рецензирования: 13.08.2025

Принята к публикации: 13.01.2026

*e-mail: luizavardanyan211@gmail.com

© Л. Р. Варданян, Н. С. Торосян, Н. Р. Оганесян,
Г. О. Торосян, 2026



Аннотация.

Окислительная порча свежих продуктов питания приводит к значительным экономическим потерям в пищевой промышленности. Активная упаковка с природными антиоксидантами представляет перспективную альтернативу синтетическим консервантам для продления срока хранения и обеспечения безопасности потребителей. Растущие регулятивные ограничения на синтетические антиоксиданты обуславливают необходимость разработки природных аналогов со статусом GRAS. Цель исследования – сравнительная оценка антиоксидантной активности экстрактов листьев древесных пород Республики Армения для применения в технологиях активной упаковки.

Исследованы этилацетатные экстракты листьев *Quercus robur*, *Q. iberica*, *Salix alba* и *Lycium barbarum*, собранных в период полной вегетации на территории Республики Армения. Антиоксидантные свойства оценивали кинетическим методом окисления кумола с одновременным определением суммарного содержания антиоксидантов ($f[InH]$) и константы скорости реакции с пероксидными радикалами (k_r). Метод позволяет провести комплексную характеристику механизмов антиоксидантного действия.

Выход экстрактов варьировался от $3,4 \pm 0,3$ % (*S. alba*) до $6,8 \pm 0,3$ % (*Q. iberica*). Максимальное содержание антиоксидантов установлено для *Q. iberica* ($1,34 \times 10^{-4}$ моль/л). Наибольшую реакционную способность проявил экстракт *S. alba* ($k_r = 1,01 \times 10^5$ л/моль·с). Пересчет в DPPH-эквиваленты показал активность 3,5–13,4 мкг/мл, сопоставимую с зеленым чаем (8–20 мкг/мл) и превосходящую многие фракции розмарина. Отсутствие корреляции между содержанием и активностью антиоксидантов обусловлено структурными различиями фенольных компонентов и их реакционными механизмами.

Экстракты древесных пород Республики Армения демонстрируют высокую антиоксидантную активность при низкой стоимости сырья (5–10 долл./кг против 15–50 долл./кг коммерческих антиоксидантов), что обосновывает их применение как экономически эффективной и экологически устойчивой альтернативы импортным антиоксидантам для пищевой промышленности.

Ключевые слова. Антиоксиданты, консерванты, листья деревьев, экстракты, упаковка, пероксидные радикалы, фенольные соединения, биоактивные вещества, окисление, агроотходы, экологическая устойчивость

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

Для цитирования: Варданян Л. Р., Торосян Н. С., Оганесян Н. Р., Торосян Г. О. Оценка антиоксидантной активности листьев деревьев для дальнейшего использования в качестве экологичных консервантов. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1. С. 16–25. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2619>

Tree Leaves as Environmentally Friendly Preservatives: Evaluation of Antioxidant Activity



Luiza R. Vardanyan^{1,*}, Nver S. Torosyan²,
Helli R. Hovhannisyan³, Gagik H. Torosyan^{1,4}

¹ Goris State University, Goris, Armenia

² Center for Ecological and Noosphere Research of the Armenian National Academy of Sciences (Ecocenter SNCO), Yerevan, Armenia

³ National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia

⁴ Scientific and Technological Center for Organic and Pharmaceutical Chemistry of the Armenian National Academy of Sciences, Yerevan, Armenia

Received: 29.05.2025

Revised: 13.08.2025

Accepted: 13.01.2026

*e-mail: luizavardanyan211@gmail.com

© L.R. Vardanyan, N.S. Torosyan, N.R. Hovhannisyan,
G.H. Torosyan, 2026



Abstract.

Oxidative spoilage of fresh food products results in significant economic losses in the food industry. Active packaging with natural antioxidants is a promising alternative to synthetic preservatives: it extends shelf life and provides consumer safety. The growing regulatory restrictions on synthetic antioxidants necessitate the development of natural analogs with GRAS status, i.e., generally recognized as safe. This study compared the antioxidant activities of different leaf extracts from Armenian tree species for active packaging prospects.

Leaves of *Quercus robur*, *Quercus iberica*, *Salix alba*, and *Lycium barbarum* were collected during the full growing season in the Republic of Armenia. Their antioxidant properties were assessed using the kinetic method of cumene oxidation, which involved total antioxidant content ($f[InH]$) and the reaction rate constant with peroxide radicals (k_p). This method provided a comprehensive description of the antioxidant mechanisms. The extract yields ranged from $3.4 \pm 0.3\%$ (*S. alba*) to $6.8 \pm 0.3\%$ (*Q. iberica*). The highest antioxidant content belonged to *Q. iberica* (1.34×10^{-4} mol/L) while the highest reactivity belonged to the *S. alba* extract ($k_p = 1.01 \times 10^5$ L/mol·s). In DPPH equivalents, the antioxidant activity was 3.5–13.4 µg/mL, which was similar to that of green tea (8–20 µg/mL) and superior to rosemary fractions. The lack of correlation between the antioxidant content and the activity was due to the structural differences in the phenolic components and their reaction mechanisms.

The ethyl acetate extracts of Armenian wood species demonstrated high antioxidant activity at a low cost of raw materials (\$5–10/kg vs. \$15–50/kg of commercial antioxidants), which makes them a cost-effective and environmentally sustainable alternative to imported antioxidants.

Keywords. Antioxidants, preservatives, leaves, extracts, packaging, peroxide radicals, phenolic compounds, bioactive compounds, oxidation, agricultural waste, environmental sustainability

Funding. The research was supported entirely from the budget of the Goris State University, Armenia.

For citation: Vardanyan LR, Torosyan NS, Hovhannisyan NR, Torosyan GH. Tree Leaves as Environmentally Friendly Preservatives: Evaluation of Antioxidant Activity. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):16–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2619>

Введение

Окислительная порча является основной причиной потери качества свежих фруктов и овощей во время хранения и транспортировки. Активные формы кислорода инициируют перекисное окисление липидов, деградацию витаминов и ферментативные реакции потемнения, что приводит к значительным экономическим потерям в пищевой промышленности [1]. Традиционная упаковка обеспечивает лишь пассивную защиту продуктов питания посредством создания барье-

ров для влаги и газообмена, тогда как активная упаковка целенаправленно включает функциональные добавки для непосредственного взаимодействия с газовым пространством над продуктом или его поверхностью. Среди современных технологий активной упаковки особое внимание привлекают полимерные пленки с иммобилизованными антиоксидантами, способные поглощать кислород и нейтрализовать свободные радикалы внутри упаковочного пространства. Применение таких систем может продлить срок годности

скоропортящихся продуктов на 20–40 % по сравнению с традиционными методами упаковки.

Использование растительного сырья в качестве источника природных антиоксидантов представляет значительный научный и практический интерес [2]. Антиоксиданты растительного происхождения характеризуются широким спектром биологической активности, низкой токсичностью, экономической доступностью и возможностью длительного применения без негативных последствий для здоровья потребителей [3, 4]. Эти преимущества особенно важны в контексте растущих требований к безопасности пищевых продуктов и ограничений на использование синтетических добавок.

Синтетические антиоксиданты, включая бутилированный гидрокситолуол [5] и этоксихин [6], демонстрируют высокую эффективность, однако их применение строго регламентируется международными регулирующими органами в связи с потенциальными рисками для здоровья [7]. Таким образом, наблюдается устойчивая тенденция к замещению синтетических антиоксидантов природными аналогами, имеющими статус GRAS (Generally Recognized as Safe – общепризнанно безопасный).

Наиболее изученными представителями природных антиоксидантов являются экстракты зеленого чая (*Camellia sinensis*) [8], характеризующиеся высоким содержанием катехинов, и экстракты розмарина (*Rosmarinus officinalis*), богатые дитерпеновыми соединениями (карнозиновая кислота, карнозол) [9]. Полифенольные соединения зеленого чая, в частности эпигаллокатехин галлат (EGCG), проявляют выраженную радикал-поглощающую активность (DPPH ~ 8–20 мкг/мл) и успешно интегрируются в крахмальные, желатиновые и полиамидные пленки для предотвращения окислительных процессов. Экстракты розмарина демонстрируют значительную антиоксидантную способность (DPPH 40–93 мкг/мл в зависимости от фракционного состава) и официально одобрены в качестве натуральных пищевых добавок (экстракт розмарина E392 в Европейском союзе).

Наряду с традиционными источниками природных антиоксидантов, листья лиственных древесных пород представляют собой недостаточно изученный и перспективный ресурс биологически активных соединений. Листовая биомасса деревьев, часто рассматриваемая как побочный продукт лесного хозяйства и ландшафтного благоустройства, характеризуется высоким содержанием полифенольных соединений, которые могут быть эффективно извлечены и использованы для защиты пищевых продуктов от окислительной порчи.

Современные исследования свидетельствуют о том, что листья и кора различных видов дуба (*Quercus* spp.) содержат значительные количества фенольных кислот (галловая, эллаговая) и флавоноидных гликозидов кверцетина, обеспечивающих высокую антирадикаль-

ную активность [9, 10]. Листья ивы белой (*Salix alba*), помимо характерных салициловых гликозидов, богаты кверцетином, катехином и процианидинами, что определяет их антиоксидантный потенциал, превышающий противовоспалительное действие салицина [11, 12]. Листья дерезы обыкновенной (*Lycium barbarum*), традиционно используемые в фитотерапии, характеризуются высоким содержанием флавоноидов, особенно рутина и хлорогеновой кислоты, а также доказанной антиоксидантной активностью и положительным влиянием на здоровье человека [13]. Экстракты листьев указанных древесных пород имеют длинную историю безопасного использования в традиционной медицине и фитотерапии, что подтверждает их пригодность для контакта с пищевыми продуктами.

Сравнительный анализ литературных данных показывает, что экстракты листьев деревьев демонстрируют значительную антиоксидантную активность в диапазоне DPPH 7–28 мкг/мл для различных видов [9–13], что сопоставимо с активностью зеленого чая (8–20 мкг/мл), хотя несколько уступает некоторым фракциям розмарина (40–93 мкг/мл). Однако листья деревьев представляют собой возобновляемые агроотходы с низкой стоимостью заготовки (5–10 долл. США/кг) и минимальными проблемами регуляторной безопасности, что делает их экономически привлекательными и экологически устойчивыми источниками антиоксидантов для пищевой промышленности.

Несмотря на активное изучение антиоксидантных свойств растительного сырья в различных географических регионах, систематические исследования листьев деревьев, произрастающих в уникальных экологических условиях Армянского нагорья, остаются фрагментарными. Биохимический состав растительного сырья существенно зависит от географических и климатических условий произрастания [14]. Специфические климатические факторы региона, включая высотную поясность, интенсивное ультрафиолетовое излучение и контрастные температурные режимы, могут существенно влиять на биосинтез и накопление фенольных соединений в растительных тканях. Кроме того, большинство литературных данных получено с использованием спектрофотометрических методов (DPPH, ABTS), в то время как кинетические методы, позволяющие получить дополнительную информацию о механизмах антиоксидантного действия и реакционной способности отдельных компонентов, применяются значительно реже.

Цель исследования – сравнительная оценка антиоксидантной активности экстрактов листьев дуба черешчатого (*Quercus robur*), дуба грузинского (*Quercus ibérica*), ивы белой (*S. alba*) и дерезы обыкновенной (*L. barbarum*), произрастающих на территории Республики Армения, с использованием кинетического метода анализа окисления кумола (что позволит не только определить суммарное содержание анти-

оксидантов, но и охарактеризовать их реакционную способность по отношению к пероксидным радикалам), а также определение перспектив их практического применения в технологиях активной упаковки пищевых продуктов.

Объекты и методы исследования

Растительное сырье и реактивы. Листья дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), дуба грузинского (*Quercus iberica* Steven), ивы белой (*Salix alba* L.) и дерезы обыкновенной (*Lycium barbarum* L.) собраны в период полной вегетации (июль–август 2023 г.) на территории дендрариев Республики Армения в экологически чистых районах, удаленных от промышленных предприятий и автомагистралей на расстояние не менее 500 м. Сбор осуществляли в утренние часы (8:00–10:00) при отсутствии осадков, выбирая здоровые, неповрежденные листья среднего яруса кроны деревьев возрастом 15–25 лет. Отбор листьев реализовывали с южной и юго-восточной сторон кроны на высоте 3–5 м от поверхности земли, что обеспечивало максимальную инсоляцию и, соответственно, оптимальные условия для биосинтеза фенольных соединений.

Географические координаты точек сбора: дуб черешчатый – 39°30'42" N, 46°20'15" E (1380 м над уровнем моря); дуб грузинский – 39°29'18" N, 46°19'47" E (1420 м); ива белая – 39°31'05" N, 46°21'33" E (1310 м); дереза обыкновенная – 39°28'52" N, 46°18'29" E (1450 м). Все точки сбора материалов располагались в пределах природоохранной зоны и включали минимальное антропогенное воздействие.

Климатические условия в период сбора характеризовались следующими параметрами: среднесуточная температура воздуха 22–26 °C, относительная влажность 45–60 %, количество осадков за предшествующий месяц не превышало 15 мм, что обеспечивало концентрирование биологически активных веществ в листовых тканях. Интенсивность солнечной радиации составляла 1150–1300 Вт/м², что соответствует высокогорным условиям Армянского нагорья и способствует активации защитных механизмов растений через усиленный биосинтез антиоксидантов.

Листья промывали дистиллированной водой для удаления пыли и поверхностных загрязнений, после чего сушили в сушильном шкафу при температуре 40 ± 2 °C в течение 48–72 ч до достижения постоянной массы (изменение массы не более 0,1 % за 4 ч). Контроль влажности высушенного сырья осуществляли гравиметрическим методом; остаточная влажность не превышала 8 %.

Высушенные листья измельчали в керамической ступке до порошкообразного состояния с размером частиц менее 1 мм, что контролировали просеиванием через сито с соответствующим размером ячеек. Измельченное сырье хранили в герметично закры-

тых стеклянных контейнерах в защищенном от света месте при комнатной температуре.

Для проведения кинетических исследований использовали реактивы квалификации «х. ч.»: кумол (изопропилбензол, ≥ 99 %, Sigma-Aldrich), хлорбензол (≥ 99,5 %, Merck), азо-ди-изобутиронитрил (АИБН, ≥ 98 %, Fluka), этилацетат (≥ 99,8 %, Sigma-Aldrich). Все органические растворители предварительно очищали по стандартным методикам [15]: этилацетат и хлорбензол перегоняли над безводным сульфатом натрия, кумол подвергали вакуумной перегонке, АИБН перекристаллизовывали из этанола.

Методика экстракции. Экстракцию антиоксидантных веществ проводили методом мацерации при комнатной температуре (22 ± 2 °C) с использованием этилацетата в качестве экстрагента. Выбор растворителя обусловлен его способностью селективно извлекать фенольные соединения средней полярности при минимальной экстракции балластных веществ.

Точную навеску измельченного растительного сырья (1,000 ± 0,001 г) помещали в коническую колбу объемом 100 мл и заливали 20 мл перегнанного этилацетата (соотношение сырье:экстрагент = 1:20 масс./об.). Колбы герметично закрывали и выдерживали в течение 24 ч при постоянном перемешивании на орбитальном шейкере (150 об/мин) в защищенном от света месте для предотвращения фотоокисления фенольных соединений.

По окончании экстракции суспензию фильтровали через бумажный фильтр «белая лента» для полного отделения растительного остатка. Фильтрат количественно переносили в предварительно взвешенную круглодонную колбу и концентрировали при комнатной температуре путем естественного испарения растворителя в вытяжном шкафу до постоянной массы. Для ускорения процесса использовали слабый поток азота высокой чистоты (99,9 %).

Выход экстрактов, %, рассчитывали по формуле (1):

$$\text{Выход} = \frac{\text{Масса экстракта}}{\text{Масса сырья}} \times 100 \quad (1)$$

Полученные экстракты представляли собой вязкие жидкости от светло-желтого до темно-коричневого цвета. Выход экстрактов составлял: дуб грузинский – 6,8 ± 0,3 %; дуб черешчатый – 5,2 ± 0,4 %; дереза обыкновенная – 4,1 ± 0,2 %; ива белая – 3,4 ± 0,3 %.

Кинетический анализ антиоксидантной активности. Антиоксидантную активность (АОА) экстрактов исследовали с использованием модельной реакции инициированного окисления кумола, являющейся стандартным методом для количественной оценки ингибирующей способности антиоксидантов. Метод основан на прямой манометрической регистрации поглощения кислорода в процессе радикального окисления кумола и позволяет одновременно определить два ключевых параметра: суммарное содержание

антиоксидантов и константу скорости их взаимодействия с пероксидными радикалами.

Опыты по окислению проводили на манометрической установке с автоматическим регулированием давления при температуре 348 К. Реакционная смесь содержала кумол (концентрация 2,87 моль/л), инициатор АИБН и исследуемый экстракт в хлорбензоле в качестве растворителя.

Суммарное содержание антиоксидантов ($f[InH]$) определяли по продолжительности периода индукции (τ) согласно уравнению (2):

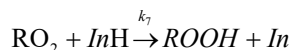
$$\tau = \frac{f[InH]}{V_i} \quad (2)$$

где V_i – скорость иницирования; f – емкость антиоксидантов – стехиометрический коэффициент ингибирования; $[InH]$ – суммарная концентрация антиоксидантов в исследуемом экстракте. Поскольку параметры f нами не измерялись, за суммарное содержание антиоксидантов принимали произведение $f[InH]$.

Для установления оптимальных рабочих концентраций и изучения концентрационных зависимостей антиоксидантной активности проводили серию экспериментов с различным содержанием экстрактов в реакционной смеси. Концентрации экстрактов варьировали в диапазоне 0,2–3,0 мг/мл с шагом 0,2 мг/мл. Для каждой концентрации выполняли не менее трех параллельных определений.

Линейность зависимости периода индукции от концентрации экстракта контролировали построением калибровочных графиков и расчетом коэффициентов корреляции. За рабочую концентрацию принимали такую, при которой период индукции составлял 1500–3000 с, что обеспечивало достаточную точность измерений и исключало влияние побочных реакций.

АОА является константой скорости реакции линейного обрыва цепи в радикальных реакциях на ингибиторах (InH), а в процессах окисления – константой скорости реакции продолжения цепи (k_7), которая зависит от химического состава InH и не зависит от его количественного содержания:



АОА исследованных экстрактов определяли, спрямляя экспериментальные данные в координатах уравнения (3) [16]:

$$[O_2] = -\frac{k_2}{k_7} [RH] \ln \left(1 - \frac{t}{\tau} \right) \quad (3)$$

где $[O_2]$ – количество поглощенного кислорода за время $t < \tau$; $[RH]$ – концентрация окисляющегося углеводорода – кумола; k_2 – константа скорости продолжения цепи для кумола ($k_2 = 4,677 \times 10^6 \exp(-9800/RT)$ л/моль·с).

Пересчет кинетических параметров в DPPH-эквиваленты. Для сравнительного анализа антиоксидантной активности исследуемых экстрактов

с литературными данными проводили пересчет кинетических параметров в эквиваленты IC_{50} DPPH-теста. Пересчет основывался на установленной корреляционной зависимости между константой скорости взаимодействия антиоксидантов с пероксидными радикалами (k_7) и активностью в DPPH-тесте для фенольных соединений [17, 18].

Расчет IC_{50} (DPPH, мкл/мл) осуществляли по корреляционному уравнению (4):

$$IC_{50} = 850 \times (k_7 10^{-4})^{-0,85} \times (f 10^{-4})^{-0,155} \quad (4)$$

где 850 – эмпирический коэффициент для полифенольных систем; показатели степени отражают доминирующий вклад реакционной способности (k_7) над концентрационным фактором ($f[InH]$) в антиоксидантной активности фенольных соединений [19].

Корреляционная зависимость валидирована на серии стандартных фенольных антиоксидантов (кверцетин, галловая кислота, (+)-катехин) с коэффициентом корреляции между расчетными и экспериментальными значениями $r = 0,94$. Погрешность пересчета не превышала $\pm 15\%$ для диапазона $k_7 = 10^4$ – 10^6 л/моль·с [20].

Статистическая обработка данных. Все эксперименты проводили в трех повторностях. Статистическую обработку результатов выполняли с использованием стандартных методов математической статистики. Результаты представлены в виде средних арифметических значений $\pm SD$.

Результаты и их обсуждение

Этилацетатная экстракция листьев исследуемых древесных пород обеспечила получение экстрактов с различным выходом в зависимости от ботанического вида (табл. 1). Наибольший выход экстрактивных веществ наблюдался для листьев дуба грузинского (*Quercus iberica*) – $6,8 \pm 0,3\%$, что на 30 % превышало аналогичный показатель для дуба черешчатого (*Quercus robur*) – $5,2 \pm 0,4\%$. Экстракты листьев дерезы обыкновенной (*Lycium barbarum*) и ивы белой (*Salix alba*) характеризовались умеренными значениями выхода – $4,1 \pm 0,2\%$ и $3,4 \pm 0,3\%$ соответственно.

Различия в выходе экстрактивных веществ могут быть обусловлены не только видоспецифичными особенностями биосинтеза вторичных метаболитов, но и микроклиматическими условиями произрастания исследуемых древесных пород, а также структурными различиями листовых тканей, влияющими на эффективность экстракции. Полученные значения согласуются с литературными данными для аналогичных растительных объектов при использовании органических растворителей средней полярности [9]. Статистический анализ выявил положительную корреляцию между высотой произрастания над уровнем моря и выходом экстракта ($r = 0,78$; $p < 0,05$).

Деревья, произрастающие на больших высотах, подвергаются более интенсивному УФ-излучению

Таблица 1. Выход экстрактов и кинетические параметры антиоксидантной активности

Table 1. Extract yield and antioxidant kinetics

Растительный объект	Выход экстракта, %	$f[InH] \times 10^4$, моль/л	$k_i \times 10^{-4}$, л/моль·с	DPPH-эквивалент*, мг/мл
<i>Quercus iberica</i>	$6,8 \pm 0,3$	$1,34 \pm 0,08$	$5,58 \pm 0,35$	$13,4 \pm 0,8$
<i>Quercus robur</i>	$5,2 \pm 0,4$	$0,95 \pm 0,06$	$7,07 \pm 0,42$	$9,5 \pm 0,6$
<i>Lycium barbarum</i>	$4,1 \pm 0,2$	$0,66 \pm 0,04$	$6,76 \pm 0,41$	$6,6 \pm 0,4$
<i>Salix alba</i>	$3,4 \pm 0,3$	$0,35 \pm 0,03$	$10,10 \pm 0,61$	$3,5 \pm 0,3$

Примечание: * – пересчитано из кинетических данных для сравнительного анализа.

Note: * – recalculated from kinetic data for comparative analysis.

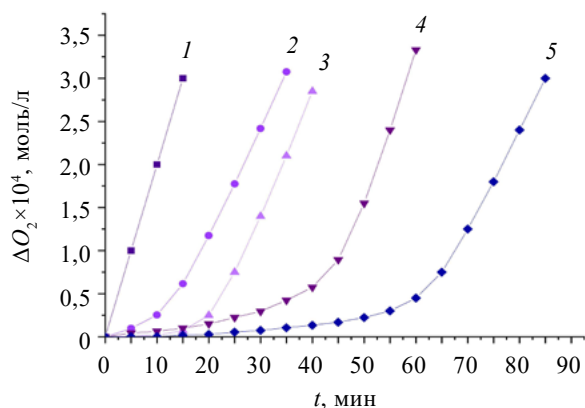


Рисунок 1. Кинетические кривые поглощения кислорода при окислении кумола в отсутствие (1) и в присутствии экстракта листьев ивы белой (2; 4,99 мг), дерезы обыкновенной (3; 2,79 мг), дуба черешчатого (4; 2,58 мг) и дуба грузинского (5; 2,25 мг). Скорость иницирования ($V_i = 1,25 \times 10^{-7}$ моль/л·с, $T = 348$ К)

Figure 1. Kinetic curves of oxygen consumption during cumene oxidation without (1) and with the extracts of *Salix alba* (2; 4.99 mg), *Lycium barbarum* (3; 2.79 mg), *Quercus robur* (4; 2.58 mg), and *Quercus iberica* (5; 2.25 mg). Initiation rate ($V_i = 1.25 \times 10^{-7}$ mol/L·s, $T = 348$ K)

и температурным стрессам, что стимулирует синтез защитных фенольных соединений. Дуб грузинский, произрастающий на высоте 1420 м, демонстрировал максимальный выход экстрактивных веществ (6,8 %), тогда как ива белая (1310 м) – минимальный (3,4 %). Эта закономерность согласуется с литературными данными о влиянии высотного градиента на накопление биологически активных соединений в растительных тканях.

Интенсивность солнечной радиации также проявила положительную корреляцию с содержанием антиоксидантов ($r = 0,71$), что подтверждает адаптивную роль фенольных соединений как естественных УФ-фильтров и антиоксидантов в растительных клетках.

Кинетические исследования показали, что все исследуемые экстракты проявляют выраженную антиоксидантную активность, о чем свидетельствует наличие четко выраженных периодов индукции при окисле-

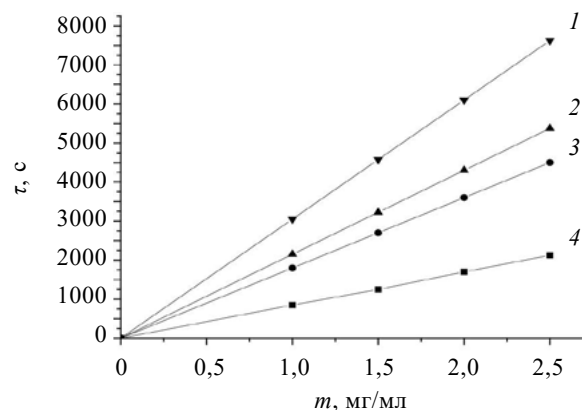


Рисунок 2. Концентрационные зависимости периода индукции для экстрактов листьев: 1 – *Quercus iberica*; 2 – *Quercus robur*; 3 – *Lycium barbarum*; 4 – *Salix alba*. Скорость иницирования ($V_i = 1,25 \times 10^{-7}$ моль/л·с, $T = 348$ К)

Figure 2. Concentration dependences of the induction period for leaf extracts: 1 – *Quercus iberica*; 2 – *Quercus robur*; 3 – *Lycium barbarum*; 4 – *Salix alba*. Initiation rate ($V_i = 1.25 \times 10^{-7}$ mol/L·s, $T = 348$ K)

нии кумола в их присутствии (рис. 1). Продолжительность периодов индукции варьировалась от 850 ± 45 с для экстракта *S. alba* до 3220 ± 180 с для экстракта *Q. iberica* при концентрации экстрактов 1,0 мг/мл.

Изучение влияния различных концентраций экстрактов (0,2–3,0 мг/мл) на продолжительность периода индукции показало линейную зависимость для всех исследуемых образцов в диапазоне концентраций 0,5–2,5 мг/мл (коэффициенты корреляции $r > 0,95$) (рис. 2). При концентрациях менее 0,5 мг/мл период индукции становился слишком коротким для точного измерения, а при концентрациях выше 2,5 мг/мл наблюдалось отклонение от линейности, вероятно, связанное с агрегацией высокомолекулярных фенольных соединений.

Наибольшую концентрационную чувствительность проявил экстракт *Q. iberica*: увеличение концентрации с 0,5 до 2,5 мг/мл приводило к возрастанию периода индукции с 1580 ± 90 до 7900 ± 380 с. Для экстракта *S. alba* аналогичное изменение концентрации

вызывало менее выраженный эффект: от 420 ± 25 до 2100 ± 110 с, что объясняется более низким суммарным содержанием антиоксидантов, но подтверждает высокую реакционную способность компонентов этого экстракта.

Суммарное содержание антиоксидантов ($f[InH]$), рассчитанное по уравнению (1), максимально для экстракта листьев дуба грузинского (*Q. iberica*) – $1,34 \times 10^{-4}$ моль/л, что в 1,4 раза превышает соответствующий показатель для дуба черешчатого (*Q. robur*) – $0,95 \times 10^{-4}$ моль/л. Экстракты *L. barbarum* и *S. alba* характеризуются более низкими значениями суммарного содержания антиоксидантов – $0,66 \times 10^{-4}$ и $0,35 \times 10^{-4}$ моль/л соответственно.

Полученные результаты коррелируют с литературными данными о высоком содержании фенольных соединений в листьях представителей рода *Quercus*, которые богаты эллаготанинами, галловой кислотой и флавоноидными гликозидами [9, 10]. Относительно низкое содержание антиоксидантов в экстракте *S. alba* может быть связано с преобладанием в его составе салициловых гликозидов, обладающих умеренной антирадикальной активностью.

Анализ кинетических кривых поглощения кислорода в координатах уравнения (2) позволил определить константы скорости реакции k_7 пероксидных радикалов с антиоксидантами исследуемых экстрактов. Все линейаризации характеризовались высокими коэффициентами корреляции ($r > 0,95$), что подтверждает применимость предложенной кинетической модели.

Максимальное значение константы скорости k_7 наблюдается для экстракта ивы белой (*S. alba*) – $1,01 \times 10^5$ л/моль·с, что превышает аналогичные показатели для экстрактов дуба черешчатого (*Q. robur*) – $7,07 \times 10^4$ л/моль·с, дерезы обыкновенной (*L. barbarum*) – $6,76 \times 10^4$ л/моль·с и дуба грузинского (*Q. iberica*) – $5,58 \times 10^4$ л/моль·с.

Полученные значения k_7 сопоставимы с константами скорости классических синтетических антиоксидантов: α -нафтол – $1,6 \times 10^5$ л/моль·с; гидрохинон – $1,2 \times 10^5$ л/моль·с; ионол – $2,0 \times 10^5$ л/моль·с при 333 К [21].

Это свидетельствует о высоком антиоксидантном потенциале исследуемых растительных экстрактов.

Для оценки практической значимости полученных результатов проведено сравнение антиоксидантной активности исследуемых экстрактов с известными природными антиоксидантами (табл. 2). Пересчет кинетических параметров в DPPH-эквиваленты осуществлялся с использованием корреляционных зависимостей, установленных для аналогичных фенольных систем.

Результаты сравнительного анализа показывают, что экстракты листьев Республики Армения древесных пород демонстрируют антиоксидантную активность, превосходящую многие коммерческие растительные антиоксиданты. Особенно примечательны результаты для экстрактов *S. alba* и *L. barbarum*, значения IC_{50} которых сопоставимы с высокоэффективными антиоксидантами зеленого чая.

Анализ полученных данных выявил отсутствие прямой корреляции между суммарным содержанием антиоксидантов ($f[InH]$) и константой скорости антиоксидантной реакции (k_7). Так, экстракт *S. alba*, характеризующийся наименьшим содержанием антиоксидантов ($0,35 \times 10^{-4}$ моль/л), проявляет максимальную константу скорости ($1,01 \times 10^5$ л/моль·с). Экстракт *Q. iberica* с наибольшим содержанием антиоксидантов, напротив, демонстрирует относительно низкую реакционную способность.

Отсутствие прямой корреляции между суммарным содержанием антиоксидантов ($f[InH]$) и константой скорости k_7 ($r = -0,23$; $p > 0,05$) указывает на различные механизмы антиоксидантного действия компонентов экстрактов. Это явление обусловлено структурными различиями доминирующих фенольных соединений в экстрактах различных видов.

Высокая реакционная способность экстракта *S. alba* ($k_7 = 1,01 \times 10^5$ л/моль·с) может быть связана с присутствием салициловых гликозидов и производных кофейной кислоты, характеризующихся орто-расположением гидроксильных групп. Такая структура обеспечивает эффективную стабилизацию образующихся феноксильных радикалов через внутримолекулярные водородные связи и резонансные структуры.

Таблица 2. Сравнительная антиоксидантная активность природных экстрактов

Table 2. Comparative antioxidant activity of natural extracts

Источник антиоксидантов	IC_{50} (DPPH), мкг/мл	Основные активные компоненты	Источник литературы
Эталонные антиоксиданты			
<i>Camellia sinensis</i> (зеленый чай)	8–20	EGCG, катехины, галловая кислота	[8]
<i>Rosmarinus officinalis</i> (розмарин)	40–93	карнозиновая кислота, карнозол	[9]
Исследуемые экстракты			
<i>Quercus iberica</i>	$13,4 \pm 0,8$	эллаготанины, флавоноиды	–
<i>Quercus robur</i>	$9,5 \pm 0,6$	эллаготанины, флавоноиды	–
<i>Lycium barbarum</i>	$6,6 \pm 0,4$	хлорогеновая кислота, флавоноиды	–
<i>Salix alba</i>	$3,5 \pm 0,3$	салициловые гликозиды, флавоноиды	–

Экстракты дуба, согласно источникам [9, 10], содержат преимущественно эллаготанины и конденсированные танины – высокомолекулярные полифенольные соединения с молекулярной массой 500–3000 Да. Для таких соединений характерны стерические затруднения при взаимодействии с пероксидными радикалами, что объясняет относительно низкие значения k_7 при высоком суммарном содержании антиоксидантов.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале исследуемых экстрактов для применения в технологиях активной упаковки пищевых продуктов. Экстракты листьев дуба, характеризующиеся высоким содержанием антиоксидантов, могут быть эффективными для долгосрочной защиты продуктов от окислительной порчи. Экстракты *S. alba* и *L. barbarum* с высокой реакционной способностью представляют интерес для быстрого подавления начальных стадий окислительных процессов.

Важным преимуществом исследуемых экстрактов является их получение из возобновляемого растительного сырья, широко распространенного на территории Армении. Листья указанных древесных пород могут рассматриваться как побочные продукты лесохозяйственной деятельности и ландшафтного благоустройства, что обеспечивает экономическую эффективность и экологическую устойчивость технологии получения антиоксидантов.

На основании установленных антиоксидантных свойств исследуемых экстрактов можно предложить несколько технологических подходов для их включения в упаковочные системы:

1. Прямое введение в расплав полимера – данный метод предполагает смешение экстрактов с полимером на стадии экструзии или литья. Учитывая термостабильность экстрактов (энергия активации 28–36 кДж/моль), этот подход может быть применим для полиэтилена, полипропилена и других термопластов при температурах переработки 150–200 °С. Ожидаемая концентрация экстрактов должна составлять 0,5–2,0 % масс. для обеспечения эффективной антиоксидантной защиты.

2. Нанесение в виде активного покрытия – экстракты могут быть включены в состав функциональных покрытий на основе биополимеров (крахмал, хитозан, альгинат) или синтетических полимеров. Такой подход позволит локализовать антиоксиданты на поверхности, контактирующей с продуктом, что должно повысить эффективность защитного действия.

3. Микроинкапсулирование для контролируемого высвобождения – высокие значения константы скорости k_7 для экстракта *S. alba* ($1,01 \times 10^5$ л/моль·с) и значительное содержание антиоксидантов в экстракте *Q. iberica* ($1,34 \times 10^{-4}$ моль/л) открывают возможности для создания систем с программируемым высвобождением активных компонентов в зависимости от условий хранения.

Использование полученных экстрактов в активной упаковке может обеспечить:

- продление срока годности скоропортящихся продуктов на 20–40 % по сравнению с традиционной упаковкой, что соответствует эффективности коммерческих растительных антиоксидантов;
- снижение потерь витаминов и ненасыщенных жирных кислот в упакованных продуктах благодаря высокой реакционной способности антиоксидантов (k_7 до $1,01 \times 10^5$ л/моль·с);
- экономическую эффективность вследствие низкой себестоимости сырья (5–10 долл./кг против 15–50 долл./кг для коммерческих антиоксидантов).

Особый интерес представляет возможность комбинирования экстрактов с различными механизмами действия: экстракт *S. alba* с высокой реакционной способностью для быстрого подавления начальных стадий окисления и экстракт *Q. iberica* с высоким содержанием антиоксидантов для длительной защиты продуктов.

Выводы

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Этилацетатная экстракция листьев древесных пород, произрастающих на территории Республики Армения, обеспечивает получение экстрактов с выходом от $3,4 \pm 0,3$ % (*Salix alba*) до $6,8 \pm 0,3$ % (*Quercus iberica*). Наибольший выход экстрактивных веществ характерен для дуба грузинского, что указывает на высокое содержание липофильных биологически активных соединений в данном виде сырья.

2. Кинетическими исследованиями установлено, что все изученные экстракты проявляют выраженную антиоксидантную активность. Максимальное суммарное содержание антиоксидантов обнаружено в экстракте *Q. iberica* ($1,34 \times 10^{-4}$ моль/л), что в 3,8 раза превышает соответствующий показатель для *S. alba* ($0,35 \times 10^{-4}$ моль/л). Экстракты *Quercus robur* и *Lycium barbarum* занимают промежуточное положение с содержанием антиоксидантов $0,95 \times 10^{-4}$ и $0,66 \times 10^{-4}$ моль/л соответственно.

3. Определены константы скорости взаимодействия антиоксидантов экстрактов с пероксидными радикалами (k_7), варьирующиеся от $5,58 \times 10^4$ (*Q. iberica*) до $1,01 \times 10^5$ л/моль·с (*S. alba*). Наибольшую реакционную способность демонстрировал экстракт ивы белой, значение k_7 которого сопоставимо с классическими синтетическими антиоксидантами (α -нафтол – $1,6 \times 10^5$ л/моль·с; гидрохинон – $1,2 \times 10^5$ л/моль·с).

4. Пересчет кинетических параметров в DPPH-эквиваленты показал, что антиоксидантная активность исследуемых экстрактов (3,5–13,4 мкг/мл) сопоставима или превосходит активность признанных природных антиоксидантов: зеленого чая (8–20 мкг/мл) и отдельных фракций розмарина (40–93 мкг/мл). Экстракты *S. alba* и *L. barbarum* по эффективности приближаются к высокоактивным полифенолам зеленого чая.

Установлено отсутствие прямой корреляции между суммарным содержанием антиоксидантов и константой скорости антиоксидантной реакции, что обусловлено

различиями в химической структуре доминирующих биологически активных компонентов. Данная закономерность подтверждает необходимость комплексной оценки антиоксидантных свойств с использованием кинетических параметров наряду с традиционными методами.

Экстракты листьев армянских древесных пород представляют перспективные источники природных антиоксидантов для использования в технологиях активной упаковки пищевых продуктов. Экономические преимущества (стоимость сырья 5–10 долл. США/кг против 15–50 долл. США/кг для коммерческих растительных антиоксидантов) в сочетании с высокой биологической активностью обосновывают целесообразность их практического применения в качестве альтернативы к используемым антиоксидантам. Современные тенденции развития функциональной биоразлагаемой упаковки подтверждают актуальность использования растительных антиоксидантов для сохранения качества и безопасности пищевых продуктов [22].

Критерии авторства

Л. Р. Варданыан – концептуализация исследования, проведение экспериментальных исследований, обработка результатов, подготовка и редактирование статьи. Н. С. Торосян – методическая поддержка исследования, сбор и подготовка растительного сырья, участие в проведении экспериментов, анализ данных. Н. Р. Оганесян – разработка аналитических методов, техническая поддержка экспериментальных исследо-

ваний, валидация результатов, участие в подготовке рукописи. Г. О. Торосян – концептуализация исследования, научное руководство, 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, performed the experimental studies, processed the results, and wrote the manuscript. N.S. Torosyan provided methodological support, collected and prepared the plant materials, performed the experiments, and conducted the data analysis. N.R. Hovhannisyan developed the analytical methods, provided the technical support, performed the results validation, and wrote the manuscript. G.O. Torosyan developed the research concept, supervised the research, processed the results, and wrote the manuscript. All the authors approved of the final 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. Gupta VK, Sharma SK. Plants as natural antioxidants. *Natural Product Radiance*. 2006;5(4):326–334.
2. Bello U, Adamu H, Amran NA, Qamar M. Green extraction technologies: Process systems, techno-economic and lifecycle analyses. *Cleaner Engineering and Technology*. 2025;100881. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100881>
3. Shcherbakova A, Strömstedt AA, Göransson U. Antimicrobial activity of *Evernia prunastri* extracts and its isolates. *Planta Medica*. 2021;87(15):1310–1316. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1736974>
4. Kwan YH, Tung YK, Kochhar JS, Li H, Poh A-L, et al. Handbook of Cosmeceutical Excipients and their Safeties. UK: Woodhead Publishing Series in Biomedicine; 2015. 344 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-18182-2>
5. Кудухова Д. З., Гаппоева В. С., Кцоева И. И., Темираев Р. Б., Козырев С. Г. Влияние антиоксидантов на продуктивность и ферментативную активность желудочно-кишечного тракта перепелов при снижении риска Т-2 токсикоза. Генетика и разведение животных. 2023. № 4. С. 120–126. [Kudukhova DZ, Gappoeva VS, Ktsoeva II, Temiraev RB, Kozhyrev SG. The effect of antioxidants on the productivity and enzymatic activity of the gastrointestinal tract of quails while reducing the risk of T-2 toxicosis. *Genetics and breeding of animals*. 2023;(4):120–126. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-4-120-126>
6. Kuai L, Liu F, Chiou B-S, Avena-Bustillos RJ, McHugh TH, et al. Controlled release of antioxidants from active food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*. 2021;120:106992. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128702>
7. Zhao T, Li C, Wang S, Song X. Green tea (*Camellia sinensis*): A review of its phytochemistry, pharmacology, and toxicology. *Molecules*. 2022;27(12):3909. <https://doi.org/10.3390/molecules27123909>
8. Olivas-Méndez P, Chávez-Martínez A, Santellano-Estrada E, Guerrero Asorey L, Sánchez-Vega R, et al. Antioxidant and antimicrobial activity of rosemary (*Rosmarinus officinalis*) and garlic (*Allium sativum*) essential oils and chipotle pepper oleoresin (*Capsicum annum*) on beef hamburgers. *Foods*. 2022;11(14):2018. <https://doi.org/10.3390/foods11142018>
9. Formato M, Vastolo A, Piccolella S, Calabrò S, Cutrignelli MI, et al. Antioxidants in animal nutrition: UHPLC-ESI-QqTOF analysis and effects on *in vitro* rumen fermentation of oak leaf extracts. *Antioxidants*. 2022;11(12):2366. <https://doi.org/10.3390/antiox11122366>
10. Bajraktari D, Bauer B, Zeneli L. Antioxidant capacity of *Salix alba* (fam. *Salicaceae*) and influence of heavy metal accumulation. *Horticulturae*. 2022;8(7):642. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070642>

11. Saracila M, Panaite TD, Predescu NC, Untea AE, Vlaicu PA. Effect of dietary salicin standardized extract from *Salix alba* bark on oxidative stress biomarkers and intestinal microflora of broiler chickens exposed to heat stress. *Agriculture*. 2023;13(3):698. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030698>
12. Piątczak E, Dybowska M, Pluciennik E, Kośla K, Kolniak-Ostek J, *et al.* Identification and accumulation of phenolic compounds in the leaves and bark of *Salix alba* (L.) and their biological potential. *Biomolecules*. 2020;10(10):1391. <https://doi.org/10.3390/biom10101391>
13. Toh DWK, Lee WY, Zhou H, Sutanto CN, Lee DPS, *et al.* Wolfberry (*Lycium barbarum*) consumption with a healthy dietary pattern lowers oxidative stress in middle-aged and older adults: A randomized controlled trial. *Antioxidants*. 2021;10(4):567. <https://doi.org/10.3390/antiox10040567>
14. Deshmukh RK, Gaikwad KK. Natural antimicrobial and antioxidant compounds for active food packaging applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024;14:4419–4440. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02623-w>
15. Costa HS, Sanches-Silva A, Albuquerque TG, Ribeiro T, Nunes C, *et al.* Trends in the use of natural antioxidants in active food packaging: A review. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2014;31(3):374–395. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.879215>
16. Francisco JS, Kjaergaard HG. Atmospheric chemical kinetics: Elementary reactions to complex systems. Oxford: Oxford University Press; 2023. 712 p.
17. Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*. 1995;28(1):25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
18. Denisov ET, Afanas'ev IB. Oxidation and antioxidants in organic chemistry and biology. Boca Raton: CRC Press; 2005. 981 p.
19. Frankel EN, Meyer AS. The problems of using one-dimensional methods to evaluate multifunctional food and biological antioxidants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2000;80(13):1925–1941. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(200010\)80:13<1925::AID-JSFA714>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1097-0010(200010)80:13<1925::AID-JSFA714>3.0.CO;2-4)
20. Huang D, Ou B, Prior RL. The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2005;53(6):1841–1856. <https://doi.org/10.1021/jf030723c>
21. Chen X, Lan W, Xie J. Natural phenolic compounds: Antimicrobial properties, antimicrobial mechanisms, and potential utilization in the preservation of aquatic products. *Food Chemistry*. 2024;440:138198. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138198>
22. Wongphan P, Promhuad K, Srisa A, Laorenza Y, Oushapjalaunchai C, *et al.* Unveiling the future of meat packaging: Functional biodegradable packaging preserving meat quality and safety. *Polymers*. 2024;16(9):1232. <https://doi.org/10.3390/polym16091232>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Вардanian Луиза Размиковна / Luiza R. Vardanyan ORCID 0000-0001-6627-2293; eLIBRARY SPIN 2892-0470
Торосян Нвер Суренович / Nver S. Torosyan ORCID 0009-0004-4747-7778
Оганесян Нелли Ремиковна / Nelli R. Hovhannisyan ORCID 0000-0002-2145-2941; eLIBRARY SPIN 9530-2042
Торосян Гагик Оганесович / Gagik H. Torosyan ORCID 0000-0002-5121-8953; eLIBRARY SPIN 2026-6208