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

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2628
https://elibrary.ru/HPVGTY

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Влияние параметров механоактивации на выход и свойства биологически активных веществ коры *Populus tremula* L.

В. П. Сергун[1], М. М. Шамова[2,3], В. М. Позняковский[4], И. Ю. Сергеева[1,*]

[1] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

[2] *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

[3] *Общество с ограниченной ответственностью «БИОЛИТ», Томск, Россия*

[4] *Кемеровский государственный медицинский университет, Кемерово, Россия*

Поступила в редакцию: 21.12.2025
Принята после рецензирования: 09.02.2026
Принята к публикации: 03.03.2026

**e-mail: sergeeva.76@list.ru*
© В. П. Сергун, М. М. Шамова, В. М. Позняковский, И. Ю. Сергеева, 2026

Аннотация.
Повышение эффективности извлечения биологически активных веществ из растительного сырья является одной из ключевых задач современной биотехнологии и фармацевтической технологии. Однако композитная структура древесного сырья создает основной диффузионный барьер для экстракции ценных вторичных метаболитов. Цель работы – установить количественные зависимости между режимами механоактивации измельчения коры осины обыкновенной (*Populus tremula* L.), изменением ее структурно-физических характеристик и кинетикой извлечения биологически активных веществ.
Объектами исследования послужили образцы коры осины обыкновенной (Томская область, Россия). Механоактивацию проводили в планетарной мельнице АГО-2С.
Установлено, что при центробежном ускорении шаров 300 м/с^2 в течение 5–10 мин выход водно-спиртовых фракций возрастал на 9,5–19 %, при 600 м/с^2 – на 40–44 %. При скорости вращения 1395 об/мин (7–10 мин обработки) количество извлекаемых полифенолов достигло прироста 34,6 %, при 1820 об/мин – до 61,5 %. Наибольший выход салицина наблюдался при 1820 об/мин в течение 1–3 мин и составил от 0,80 ± 0,01 до 1,00 ± 0,02 % масс. Диспергирование коры осины в течение 3 мин при 1395 об/мин приводило к повышению доли углеводной составляющей D1080/D1460, спиртовых D1140/D1460, карбоксильных групп D1280/D1460, -C=C- D1600/D1460 и OH-групп D3400/D1460. При этом уменьшалось количество алкильных заместителей D2920/D1460 и карбонильных групп D1720/D1460. Механоактивация измельчения сырья в течение 1 мин при 1395 об/мин приводила к увеличению содержания антиоксидантов до 1,15 ± 0,02 моль/кг и появлению второго типа ингибиторов, при частоте вращения реакторов 1820 об/мин в течение 5 мин – 1,66 ± 0,03 моль/кг, период индукции – 90 мин.
Применение выявленных закономерностей и внедрение стадии механоактивации на действующих производствах позволили модернизировать процесс, повысив его рентабельность, а также обеспечить более полное использование возобновляемого растительного сырья для получения ценных биологически активных веществ.

Ключевые слова. Механоактивация, диспергирование, экстракция, осина, кора, *Populus tremula* L., фенилгликозиды, салицин, полифенолы, антиоксиданты

Для цитирования: Сергун В. П., Шамова М. М., Позняковский В. М., Сергеева И. Ю. Влияние параметров механоактивации на выход и свойства биологически активных веществ коры *Populus tremula* L. Техника и технология пищевых производств. 2026 Т. 56. № 1 С. 122–134. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2628

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2628
https://elibrary.ru/HPVGTY

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

Mechanically Activated Extraction of Bioactive Substances from *Populus tremula* L. Bark: Yield and Functional Properties

Valery P. Sergun[1], Maria M. Shamova[2,3], Valery M. Poznyakovsky[4], Irina Yu. Sergeeva[1,*]

[1] *Kemerovo State University, Kemerovo, Russia*

[2] *Tomsk State University, Tomsk, Russia*

[3] *LLC BIOLIT, Tomsk, Russia*

[4] *Kemerovo State Medical University, Kemerovo, Russia*

Received: 21.12.2025
Revised: 09.02.2026
Accepted: 03.03.2026

**e-mail: sergeeva.76@list.ru*

© V.P. Sergun, M.M. Shamova, V.M. Poznyakovsky, I.Yu. Sergeeva, 2026

Abstract.
A more efficient extraction of bioactive plant substances is a major biotechnological and pharmaceutical challenge. The composite structure of wood fiber creates a major diffusion barrier to the extraction of valuable secondary metabolites. This research established some reliable correlations between the mechanical activation modes, the structural and physical profile of tree bark, and the bioactive extraction kinetics.

The study involved aspen (*Populus tremula* L.) bark harvested in the Tomsk Region, Russia. The mechanical activation was performed in an AGO-2S planetary mill.

At a centrifugal acceleration of 300 m/s^2 for 5–10 min, the yield of water-alcohol fractions increased by 9.5–19%; when it was raised to 600 m/s^2, the yield increased by 40–44%. The yield of extracted polyphenols reached 34.6% at 1,395 rpm (7–10 min) and 61.5% at 1,820 rpm. The highest yield of salicin occurred at 1,820 rpm for 1–3 min and was between 0.80 ± 0.01 and 1.00 ± 0.02% by weight. A three-minute dispersion of aspen bark at 1,395 rpm increased the share of the carbohydrate component D1080/D1460, alcohol D1140/D1460, carboxyl groups D1280/D1460, -C=C- D1600/D1460, and OH groups D3400/D1460 while the number of alkyl substituents D2920/D1460 and carbonyl groups D1720/D1460 decreased. The mechanical activation of raw material during one-minute grinding at 1,395 rpm raised the antioxidant content to 1.15 ± 0.02 mol/kg and led to the formation of second type inhibitors. When the reactor speed remained 1,820 rpm for 5 min, the increase reached 1.66 ± 0.03 mol/kg, with an induction period of 90 min.

The identified patterns of mechanical pretreatment increased the profitability and sustainability of producing valuable bioactive substances from renewable plant raw materials.

Keywords. Mechanical activation, dispersion, extraction, aspen, bark, *Populus tremula* L., phenylglycosides, salicin, polyphenols, antioxidants

For citation: Sergun VP, Shamova MM, Poznyakovsky VM, Sergeeva IYu. Mechanically Activated Extraction of Bioactive Substances from *Populus tremula* L. Bark: Yield and Functional Properties. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):122–134. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2628

Введение

Растительное сырье представлено ценным возобновляемым источником широкого спектра химических соединений, включающих не только структурные углеводы, но и значительный пул биологически активных веществ (БАВ) – антиоксидантов, иммуномодуляторов и других минорных компонентов с фармакологическим потенциалом [1–6]. Ключевая технологическая проблема их извлечения заключается в физико-химической недоступности: значительная часть целевых БАВ сосредоточена внутри клеток, окруженных оболочками сложной химической организации, что препятствует их эффективному переходу в биодоступную форму при использовании традиционных методов.

Растительное сырье – это гетерогенная природная матрица, сложность которой определяется как многокомпонентным химическим составом, так и иерархической морфологией клеточных стенок. Именно надмолекулярная организация основных структурных биополимеров – целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина –

является ключевым фактором, лимитирующим кинетику и эффективность процессов их химической и экстракционной переработки. С позиции механохимии критическое значение имеет архитектура лигноцеллюлозного комплекса: микрофибриллы целлюлозы, погруженные в матрикс гемицеллюлоз, формируют жесткий каркас, который ковалентно и нековалентно связан трехмерной сетью полифенольного лигнина, выступающего в роли природного связующего. Эта композитная структура создает основной диффузионный барьер, в то время как ценные вторичные метаболиты часто локализованы внутри отдельных клеток, дополнительно изолированных сложными лигниноцеллюлозными оболочками, липидными мембранами и воскоподобными кутикулами [7].

Современные процессы переработки природного органического сырья для получения минорных компонентов в основном базируются на методах жидкостной экстракции. Для селективного выделения целевых фракций применяют последовательную обработку полярными и неполярными растворителями или их смесями [8]. Однако кинетика и общий выход при таких процессах лимитируются факторами массопереноса. Диффузия экстрагента к внутренним клеткам растительной матрицы и последующая диффузия растворенных БАВ к поверхности являются определяющими и часто медленными стадиями, поскольку химическое взаимодействие происходит на границе раздела фаз.

Основное стратегическое направление интенсификации подобных процессов заключается в преодолении диффузионных ограничений. Для этого необходимо повысить доступность внутренней поверхности сырья и разрушить естественные барьеры. Достигается это за счет применения различных механических и механохимических воздействий, которые приводят к разрыхлению компактной структуры межклеточного вещества, частичной деструкции или деполимеризации его полимерных компонентов (лигнина, гемицеллюлоз) [9]. Особое значение имеет дезинтеграция липидных оболочек (кутикулы, мембран), выступающих непреодолимым барьером для гидрофильных экстрагентов и критическим фактором для высвобождения большинства внутриклеточных минорных компонентов.

В связи с этим поиск и внедрение интенсифицирующих методов предобработки сырья и экстрагирования являются актуальными научно-практическими проблемами. Одним из наиболее эффективных и экологически безопасных подходов выступает механоактивация – направленное воздействие на твердое тело концентрированной механической энергией, приводящее к изменению его физико-химических и структурно-морфологических свойств [10]. Применительно к растительным материалам механохимическая активация в процессе измельчения (например, в планетарных мельницах, дезинтеграторах или виброцентробежных мельницах) не только обеспечивает сверхтонкий помол, но и индуцирует глубокие структурные изменения: разрушение клеточных стенок, аморфизация кристаллических фракций, увеличение удельной поверхности и создание дефектов в макромолекулах биополимеров [11].

Предварительная механическая активация обеспечивает достижение максимальной эффективности на стадии последующего экстрагирования. Ударно-сдвиговое воздействие сопровождается измельчением и разупорядочением структуры обрабатываемого материала, что существенно облегчает выделение компонентов, т. к. при размере частиц растительного сырья около 10 мкм разрушается большая часть клеточных перегородок [12].

Механическое воздействие представляет собой комбинацию нормального давления и сдвиговых деформаций. Давление преимущественно влияет на характер межчастичных взаимодействий, а площадь и число эффективных контактов между частицами являются ключевыми параметрами, определяющими скорость механохимических превращений. Однако зависимость эффективности процесса от давления имеет экстремальный характер: превышение оптимального значения приводит к чрезмерному уплотнению материала, в результате чего лимитирующей стадией становится диффузия реагентов в объеме частиц через вакансии, подавляемая повышенным давлением [13, 14].

Повышение эффективности извлечения биологически активных веществ из растительного сырья является одной из ключевых задач современной биотехнологии и фармацевтической технологии. Особый интерес в этом контексте представляет кора осины обыкновенной (*Populus tremula* L.) – перспективный источник ценных веществ, в частности фенилгликозидов (салицина, популина, тремулоидина), обладающих доказанной противовоспалительной, противомикробной и антиоксидантной активностью [15–18]. Технологическая переработка коры сопряжена с существенными трудностями, обусловленными особенностями гистологического строения [19]. Наличие плотных пробковых тканей, одревесневших элементов и высокомолекулярных полимеров (лигнина, целлюлозы) формирует выраженный диффузионный барьер, что приводит к низкой скорости экстракции, необходимости применения агрессивных сред, высоких температур и длительного времени процесса; это, в свою очередь, может спровоцировать деградацию целевых термолабильных соединений.

Ключевые факторы, обусловливающие актуальность исследования:

– необходимость преодоления природных барьеров экстракции. Традиционное измельчение коры до частиц размером 2–5 мм не обеспечивает достаточной дезинтеграции лигниноцеллюлозного комплекса. Механоактивация позволяет достичь микро- и наноуровня, разрушая клеточные структуры и делая БАВ более доступными для экстрагента;
– соответствие современным тенденциям перехода к технологиям, обеспечивающие снижение расхода

органических растворителей, температуры и продолжительности процесса. Механоактивация как физический метод предобработки отвечает принципам устойчивого развития, минимизируя негативное воздействие на окружающую среду;

– повышение экономической эффективности. Интенсификация процесса за счет механоактивации приводит к сокращению энергозатрат (вследствие ускорения экстракции), увеличению выхода целевых БАВ и, как следствие, снижению себестоимости готового экстракта;

– создание новых продуктов с улучшенными характеристиками. Возможность получения экстрактов с более высоким и стабильным содержанием маркерных веществ (например, салицина) имеет приципиальное значение для стандартизации фитопрепаратов и их соответствия требованиям фармакопеи.

Практическая значимость работы заключается в непосредственном технологическом применении полученных результатов. Для фармации особое значение имеет разработка и внедрение научно-обоснованного технологического регламента получения стандартизированного экстракта из сырья определенного климатогеографического ареала, включающего стадию механоактивации. Это позволит создавать новые эффективные отечественные лекарственные средства и биологически активные добавки к пище на основе местного сырья. Внедрение стадии механоактивации на действующих производствах позволит модернизировать процесс, повысив его рентабельность. Сокращение продолжительности мацерации с 6–8 до 1–2 ч при переходе к динамической экстракции предварительно обработанного сырья способствует увеличению пропускной способности производственной линии. Данная технологическая стадия позволит более полно использовать возобновляемое растительное сырье (кора древесного сырья нередко служит отходом лесозаготовки), повышая комплексность и экологичность лесопользования.

Цель работы – установить количественные зависимости между режимами механохимической активации измельчения коры *Populus tremula* L., изменением ее структурно-физических характеристик и кинетикой извлечения комплекса биологически активных веществ.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили образцы коры осины обыновенной (*Populus tremula* L.), произрастающей в Томской области (Россия).

Содержание суммы водорастворимых экстрактивных веществ в сырье определяли методом предварительного кипячения измельченного сырья с водой на водяной бане с обратным холодильником в течение 1,5 ч. Полученный экстракт высушивали и взвешивали. Содержание экстрактивных веществ выражали в процентах в пересчете на абсолютно сухое сырье.

Определение содержания суммы водно-спиртовых экстрактивных веществ в сырье реализовывали путем добавления к измельченному сырью, просеянному сквозь сито с отверстиями диаметром 1 мм, и к нанодиспергированному сырью 70 % этанола в качестве растворителя. Смесь нагревали при слабом кипении в течение 2 ч. Экстракт высушивали и взвешивали. Содержание экстрактивных веществ выражали в процентах в пересчете на абсолютно сухое сырье.

Оценку концентрации полифенолов проводили колориметрическим методом с применением реактива Фолина-Чокальтеу с регистрацией оптической плотности при длине волны 765 нм по ГОСТ Р ИСО 14502-1-2010.

Анализ содержания салицина в коре осины осуществляли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе LC-2010 (Shimadzu, Япония) с предварительным переводом салицина из образца нанодиспергированной коры осины в раствор путем экстракции навески водой. Регистрацию аналитического сигнала салицина проводили при градиентном элюировании с помощью ультрафиолетового детектора, руководствуясь МУ 08-47/172 «Кора ивы и осины, экстракты из них и БАД на их основе. ВЭЖХ метод определения массовой концентрации салицина».

Установление спектральных характеристик полученных экстрактов осуществляли с использованием ИК-Фурье спектрометра ФСМ 1202 (ООО «Инфраспек», Россия).

Содержание антиоксидантов в экстрактах из диспергированного сырья определяли кинетическим методом при помощи модельной реакции инициированного окисления кумола при 60 °С в присутствии инициатора [20, 21].

Исследования морфологии и гранулометрии измельченного сырья организовывали методами электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-100CX, JEOL, Япония). Объект исследования готовили следующим образом: измельченное сырье суспензировали в дистиллированной воде с помощью ультразвукового диспергатора; суспензию наносили на сетки, покрытые формваровой пленкой – подложкой.

Для определения средних размеров частиц и их распределений по размерам проводили измерения по фотографиям (при нанометровых размерах частиц) либо (при субмикронных размерах частиц) в колонне микроскопа, используя мерную шкалу, нанесенную на экран. Число измерений составляло 300–500, в зависимости от степени размерной однородности порошка.

Методика проведения механохимической обработки растительного сырья. Механоактивацию растительного сырья проводили в планетарной мельнице АГО-2С (разработка Института химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия).

Независимо от аппаратурного оформления процесса, механоактивацию можно представить как сочетание ударной и сдвиговой деформаций в зонах контакта

между воздействующими телами и частицами твердого вещества [22]. Обработка в планетарной мельнице АГО-2С характеризуется ударным воздействием. Технические характеристики мельницы АГО-2С приведены в таблице 1.

В конструкции планетарной мельницы АГО-2С с периодической загрузкой использовались два барабана, вращающихся вокруг центральной и собственной осей. Передача вращения осуществлялась фрикционным путем. Для охлаждения барабанов-реакторов и смазывания использовалась холодная вода. Каждый барабан представлял собой стальной полый цилиндр. В проведенных экспериментах барабаны загружали приблизительно на 1/3 объема стальными шарами, еще на 1/3 – исследуемым веществом; оставшаяся 1/3 объема приходилась на воздушную прослойку.

Сырье предварительно измельчали в дезинтеграторе Nossen 8255 до размера частиц 1–3 мм (частота вращения измельчающих частей 3000 об/мин).

Измельченные образцы и реагенты взвешивали на аналитических весах, затем смешивали в барабанах. Время пребывания веществ в зоне обработки варьировали от 1 до 10 мин при температуре 22 ± 1 °C.

Результаты и их обсуждение

Электронно-микроскопические исследования нанодиспергированной коры осины. Процесс измельчения коры осины до наноразмерных частиц изучали при помощи электронно-микроскопических исследований. На рисунке 1 приведены фотографии образцов, обработанных при скоростях вращения реакторов 1395, 1820 и 3200 об/мин в течение 5 мин.

Крупные частицы представляли собой ассоциированные наноразмерные объекты. Диспергирование порошка в дистиллированной воде с помощью ультразвукового диспергатора не позволило до конца разбить слипшиеся частицы (рис. 2).

В ходе обработки сырья в реакторах планетарной мельницы обнаружено, что при частоте вращения 1395 об/мин преобладали частицы диаметром 170 нм, а при 1820 об/мин – 98 нм. Наибольшая доля частиц (44 %) диаметром 55 нм получена при скорости вращения реактора 3200 об/мин. Частицы размером более 300 нм в расчет не принимались.

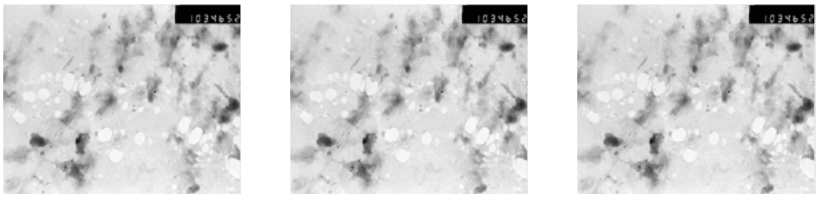
На основании данных и с учетом технико-экономических показателей процесса в дальнейших исследованиях использовались режимы обработки при скоростях вращения реактора 1395 и 1820 об/мин.

Исследование влияния условий механообработки на выход экстрактивных веществ. Совмещение механической дезинтеграции с контролируемой химической трансформацией в присутствии химических реагентов позволяет целенаправленно изменять физико-химические свойства структурных биополимеров (целлюлозы, лигнина, гемицеллюлоз), что является ключевым фактором интенсификации последующей

Таблица 1. Технические характеристики планетарной мельницы АГО-2С

Table 1. Technical characteristics of AGO-2C planetary mill

Характеристики	АГО-2С
Режим работы	периодический
Максимальный исходный размер частиц материала, мм	3
Допустимое время непрерывной работы, мин	30
Рекомендуемое время работы, мин	не более 10
Количество помольных барабанов, шт	2
Объем одного барабана, мл	150
Мелющие тела	стальные шары 8–10 мм
Масса шаровой загрузки одного барабана, кг	0,15–0,20
Частота вращения барабанов в переносном движении, об/мин	1395, 1820, 3200
Центробежное ускорение, развиваемое мелющими телами, м/с^2	300, 600, 1000
Ориентировочное время измельчения материала, мин	1–5



a b c

Рисунок 1. Образцы измельченной коры осины при скорости вращения реакторов в течение 5 мин (увеличение ×144000): a –1395 об/мин; b – 1820 об/мин; c – 3200 об/мин

Figure 1. Crushed aspen bark after 5 min at: a – 1,395 rpm; b – 1,820 rpm; and c – 3,200 rpm (magnification ×144,000)

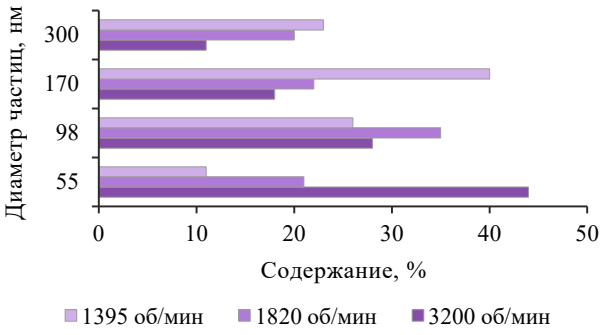


Рисунок 2. Распределение частиц измельченной коры осины по размерам

Figure 2. Particle size distribution of crushed aspen bark

экстракции целевых низкомолекулярных соединений. Эффективность данного подхода продемонстрирована на примере механоактивации порошков коры осины в присутствии твердой щелочи (например, NaOH или KOH) [23]. Интенсивное измельчение совместно со щелочами приводит к формированию реакционноспособного композита с развитой межфазной поверхностью, в котором микрочастицы щелочи равномерно распределяются в объеме материала с разрушенной клеточной структурой. Последующая гидратация такого композита в одностадийном процессе позволяет достичь предельного выхода водорастворимых веществ (в частности, фенилгликозидов), благодаря чему стадия предварительного обезжиривания становится излишней. Однако с позиций «зеленой» химии и ресурсосбережения наиболее перспективным подходом является разработка безотходных технологий прямой механохимической модификации компонентов растительного сырья в твердой фазе. В отличие от традиционной воднощелочной экстракции, неэффективной из-за блокирующего действия нерастворимых липидов и смол [24], механохимическая предобработка обеспечивает синергию физического разрушения барьеров и их химической модификации, существенно повышая доступность целевых биологически активных веществ (БАВ).

Механическую активацию применяют для повышения выхода водорастворимых веществ из коры лиственных и хвойных пород. Основными извлекаемыми компонентами коры хвойных деревьев являются дубильные вещества и пектин. При чрезмерном увеличении дисперсности сырья выход экстрактивных веществ снижается. Технологическим преимуществом механообработки коры выступает низкая продолжительность процесса отделения осадка от раствора [25].

В исследовании в образцах измельченной и диспергированной коры осины определяли содержание водно-спиртовых и водорастворимых веществ, полифенольных веществ и салицина в зависимости от скорости вращения барабанов и времени механообработки. Результаты приведены в таблицах 2 и 3.

В рамках исследования установлено, что выход водно-спиртовых веществ (ВСВ) максимально возрастает на 9,5–19 % при механоактивации в течение 5–10 мин и центробежном ускорении шаров 300 м/с^2. Независимо от времени механоактивации при скорости вращения реакторов 1395 об/мин количество извлекаемых ВСВ повышается несущественно. Из-за низкого выхода ВСВ увеличение времени обработки свыше 5 мин нецелесообразно.

Повышение ускорения шаров до 600 м/с^2 (скорость вращения 1820 об/мин) приводит к более существенному увеличению количества извлекаемых ВСВ – на 40–44 % при механоактивации 5–10 мин. С учетом технологических и экономических факторов оптимальная продолжительность механоактивации – 5 мин.

При минимальной скорости вращения 1395 об/мин количество извлекаемых полифенолов слабо зависит от времени обработки, достигая максимального прироста (34,6 %) при 7 и 10 мин обработки. В более жестких условиях диспергирования (скорость вращения 1820 об/мин) увеличение времени обработки способствует повышению выхода полифенолов до 61,5 %. Исходя из экономических и технологических аспектов переработки, диспергирование сырья в течение 3–5 мин является оптимальным.

При этом оптимальное время механоактивации сырья при скорости вращения барабанов 1395 об/мин –

Таблица 2. Влияние скорости вращения барабанов и времени механообработки коры осины на выход экстрактивных водно-спиртовых и водорастворимых веществ, полифенолов и салицина

Table 2. Effect of rotation speed and processing time on extracted water-alcohol and water-soluble substances, polyphenols, and salicin

Время обработки, мин	Содержание веществ, % масс							
	1395 об/мин				1820 об/мин			
	Водно-спиртовые	Полифенольные	Салицин	Водорастворимые	Водно-спиртовые	Полифенольные	Салицин	Водорастворимые
0	22,1 ± 0,4	2,60 ± 0,05	0,50 ± 0,01	13,6 ± 0,3	22,1 ± 0,4	2,60 ± 0,05	0,50 ± 0,01	13,6 ± 0,3
1	22,1 ± 0,4	2,60 ± 0,05	0,70 ± 0,01	28,4 ± 0,6	24,2 ± 0,5	2,90 ± 0,06	0,80 ± 0,01	32,0 ± 0,6
3	23,2 ± 0,5	3,00 ± 0,06	0,90 ± 0,02	32,6 ± 0,7	28,9 ± 0,6	3,50 ± 0,07	1,00 ± 0,02	60,4 ± 1,2
5	24,2 ± 0,5	3,00 ± 0,06	1,00 ± 0,02	41,0 ± 0,8	31,0 ± 0,6	3,90 ± 0,08	1,00 ± 0,02	29,1 ± 0,6
7	24,2 ± 0,5	3,50 ± 0,07	1,00 ± 0,02	24,2 ± 0,5	30,0 ± 0,6	4,00 ± 0,08	1,10 ± 0,02	23,6 ± 0,5
10	26,3 ± 0,6	3,50 ± 0,07	1,00 ± 0,02	22,1 ± 0,4	32,0 ± 0,6	4,20 ± 0,08	1,10 ± 0,02	20,5 ± 0,4

Таблица 3. Спектральные коэффициенты водных экстрактов коры осины при различных условиях механоактивации

Table 3. Spectral coefficients of aqueous extracts of aspen bark under various mechanical activation conditions

Время, мин	Отношение оптических плотностей поглощения						
	D_{1080}/D_{1460}	D_{1140}/D_{1460}	D_{1280}/D_{1460}	D_{1600}/D_{1460}	D_{1720}/D_{1460}	D_{2920}/D_{1460}	D_{3400}/D_{1460}
Скорость вращения 1395 об/мин							
0	1,55	0,94	1,13	1,04	0,97	1,46	1,75
3	2,14	1,13	1,22	1,32	0,81	1,10	2,25
5	2,10	1,05	1,28	1,25	0,84	2,49	1,83
7	2,07	0,63	1,25	1,27	0,80	1,07	1,90
Скорость вращения 1820 об/мин							
3	2,08	0,98	1,21	1,28	0,87	1,20	1,86
5	2,13	1,09	1,20	1,37	0,83	1,31	1,96

5 мин (прирост водорастворимых веществ в 3 раза), а при 1820 об/мин – 3 мин (прирост более чем в 4 раза). Дальнейшее увеличение времени обработки резко снижает количество экстрагируемых веществ.

Наибольший выход салицина при механоактивации сырья в течение 1–3 мин получен в реакторах, вращающихся со скоростью 1820 об/мин. Последующее увеличение времени обработки (до 5, 7 и 10 мин) не приводит к заметному росту концентрации салицина. Его значение остается постоянным независимо от времени диспергирования сырья и скорости вращения реакторов. При механоактивации сырья в реакторах со скоростью 1395 об/мин в течение 1–3 мин выход салицина ниже, чем при скорости 1820 об/мин. При времени обработки 5–10 мин количество извлекаемого салицина остается неизменным.

В исследовании применены энергонапряженные режимы измельчения. При измельчении медной руды с использованием шаровых мельниц для повышения раскрытия рудных тел особое внимание уделяется оптимизации ключевых рабочих параметров, в том числе скорости вращения мешалки. Используя модели Гейтса-Годена-Шумана и функцию Розина-Рамлера-Бенне, A.M. Elbendari & S.S. Ibrahim установили оптимальную скорость вращения мешалки (500 об/мин), позволяющую получать частицы (100 %) с размером порядка 1 мкм. Однако достижение данного показателя происходило при продолжительности процесса измельчения 17 ч [26].

Перспективным направлением является совершенствование конструкции аппаратов для измельчения. W.S. Soares *et al.* предложили систему выгрузки измельченного материала, которая изолирует подаваемый материал от механизма выгрузки. Это позволяет не только увеличить полезный объем мельницы, но и решить такие распространенные проблемы традиционных систем выгрузки через решетку, как обратный поток и пересыпание. Такая конструкция существенно повышает эффективность измельчения, о чем свидетельствуют увеличение степени разрушения и снижение удельного энергопотребления [27].

Учитывая достигнутые результаты в переработке минерального сырья, планируется изучить пути оптимизации энергозатрат касательно растительных объектов, с особым вниманием к пределу измельчения древесины.

Исследование спектральных характеристик экстрактивных веществ из коры осины. Для оценки влияния механоактивации на состав водных экстрактов из коры осины были сняты инфракрасные спектры, представленные на рисунках 3–7.

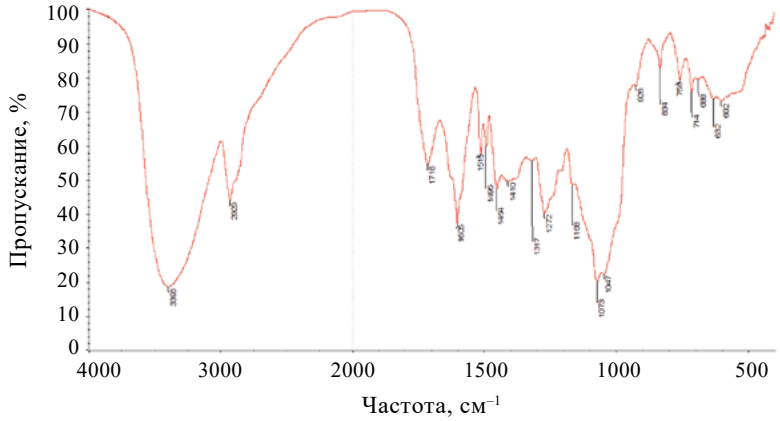


Рисунок 3. Инфракрасный спектр водорастворимых веществ, извлеченных из исходной коры осины

Figure 3. Infrared spectrum of water-soluble substances extracted from aspen bark

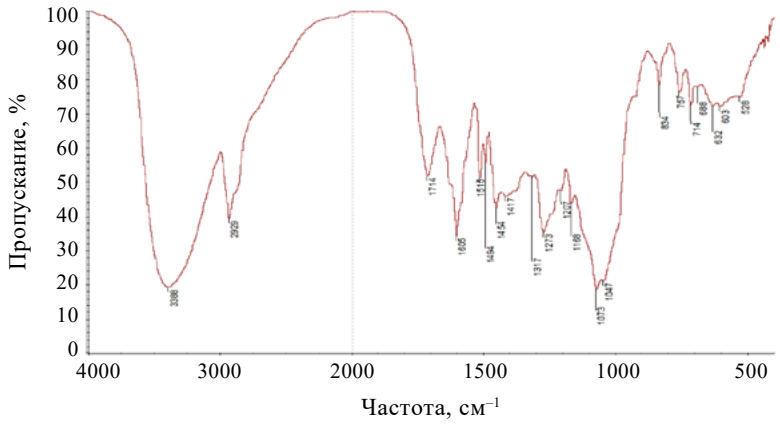


Рисунок 4. Инфракрасный спектр водорастворимых веществ, извлеченных из коры осины, обработанной при скорости вращения реакторов 1395 об/мин в течение 1 мин

Figure 4. Infrared spectrum of water-soluble substances extracted from aspen bark 1,395 rpm, 1 min

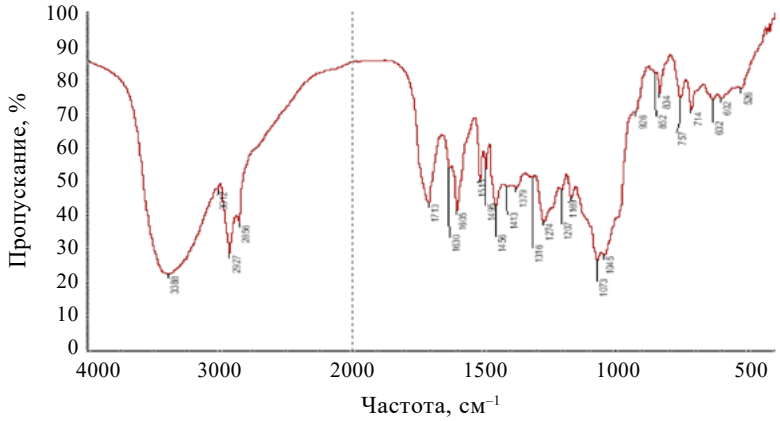


Рисунок 5. Инфракрасный спектр водорастворимых веществ, извлеченных из коры осины, обработанной при скорости вращения реакторов 1395 об/мин в течение 3 мин

Figure 5. Infrared spectrum of water-soluble substances extracted from aspen bark at 1,395 rpm, 3 min

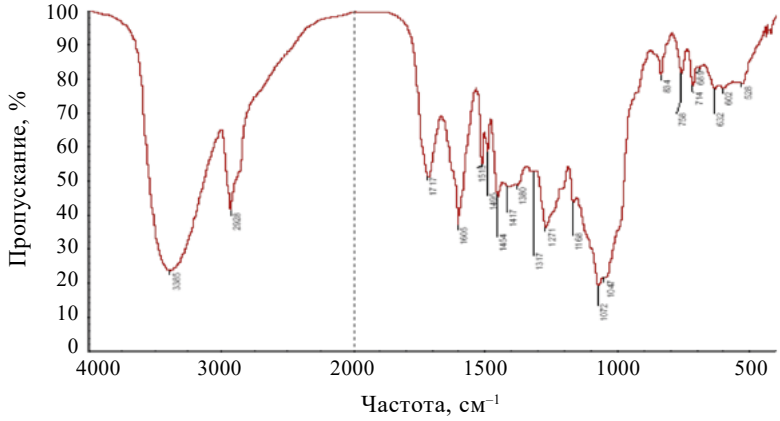


Рисунок 6. Инфракрасный спектр водорастворимых веществ, извлеченных из коры осины, обработанной при скорости вращения реакторов 1395 об/мин в течение 5 мин

Figure 6. Infrared spectrum of water-soluble substances extracted from aspen bark at 1,395 rpm, 5 min

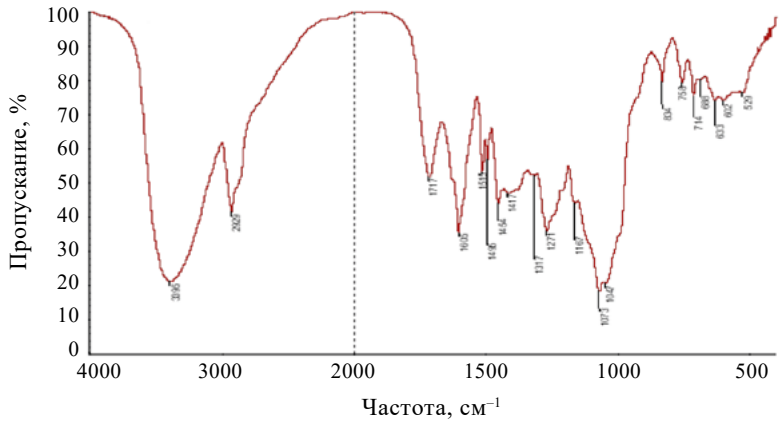


Рисунок 7. Инфракрасный спектр водорастворимых веществ, извлеченных из коры осины, обработанной при скорости вращения реакторов 1395 об/мин в течение 7 мин

Figure 7. Infrared spectrum of water-soluble substances extracted from aspen bark at 1,395 rpm, 7 min

Таблица 4. Содержание антиоксидантов и реакционная активность (К) антиоксидантов в водно-спиртовых экстрактах выделенных образцов коры осины, обработанных при разных условиях

Table 4. Content and reactivity (K) of antioxidants in water-alcohol extracts isolated from aspen bark under different conditions

Время обработки, мин	Антиоксиданты общ, моль/кг	[1]Антиоксиданты, моль/кг	[2]Антиоксиданты, моль/кг	$^{1}K_7\ 10^4$ л/моль·с	$^{2}K_7 10^3$ л/моль·с
Без обработки	0,76 ± 0,01	–	0,76 ± 0,01	–	5,10 ± 0,10
Скорость вращения 1395 об/мин					
1	1,15 ± 0,02	0,160 ± 0,003	0,99 ± 0,02	0,400 ± 0,008	3,20 ± 0,06
3	1,28 ± 0,02	0,280 ± 0,005	1,00 ± 0,02	0,300 ± 0,006	3,70 ± 0,07
5	1,44 ± 0,02	0,400 ± 0,008	1,04 ± 0,02	0,400 ± 0,008	2,60 ± 0,05
7	1,15 ± 0,02	0,210 ± 0,004	0,64 ± 0,01	0,300 ± 0,006	2,80 ± 0,05
10	0,96 ± 0,02	–	0,96 ± 0,02	–	5,60 ± 0,11
Скорость вращения 1820 об/мин					
1	1,21 ± 0,02	0,56 ± 0,01	0,65 ± 0,01	0,500 ± 0,010	4,20 ± 0,08
3	1,37 ± 0,03	0,32 ± 0,01	1,05 ± 0,02	0,300 ± 0,006	3,80 ± 0,07
5	1,66 ± 0,03	0,55 ± 0,01	1,11 ± 0,02	0,400 ± 0,008	3,20 ± 0,06

Примечание: [1] – частота вращения реактора – 1395 об/мин; [2] – частота вращения реактора – 1820 об/мин.

Note: [1] – 1,395 rpm; [2] – 1,820 rpm.

В спектре водорастворимых веществ из необработанной коры осины идентифицированы следующие полосы поглощения: 3400 $см^{-1}$ обусловлены ОН-группами, 2930 и 2870 $см^{-1}$ – CH_2- и CH_3-группами, 1700 $см^{-1}$ – СО- и СООН-группами, 1600 $см^{-1}$ – С=С-сопряженные, 1500–1510 $см^{-1}$ – С=С-ароматические, 1400 $см^{-1}$ – СН- , 1370–1120 $см^{-1}$ – спиртовые, 1200 $см^{-1}$ – карбоксильные, 1030 $см^{-1}$ – углеводные.

Механоактивация сырья даже при минимальной скорости вращения оказывала существенное влияние на состав водорастворимых веществ. Диспергирование коры осины в течение 3 мин приводило к повышению доли углеводной составляющей D_{1080}/D_{1460}, спиртовых D_{1140}/D_{1460}, карбоксильных групп D_{1280}/D_{1460}, -С=С- D_{1600}/D_{1460} и ОН-групп D_{3400}/D_{1460}. При этом уменьшалось количество алкильных заместителей D_{2920}/D_{1460} и карбонильных групп D_{1720}/D_{1460} (табл. 4). Условное содержание функциональных групп (спектральные коэффициенты) рассчитывали как отношение оптических плотностей полос поглощения на разных длинах волн к оптической плотности полосы при 1460 $см^{-1}$.

В функциональном составе водорастворимых веществ из сырья, обработанного в течение 5 мин, происходили аналогичные изменения, за исключением повышения количества алкильных заместителей. Водный экстракт, извлеченный из сырья, обработанного в течение 7 мин, характеризовался уменьшением доли спиртовых групп и алкильных заместителей. Общей отличительной чертой всех образцов является значительное увеличение гидроксильных групп и сопряженных -С=С-фрагментов.

Изменения функционального состава водорастворимых веществ из коры осины, обработанной при 1820 об/мин, аналогичны изменениям, наблюдаемым

при обработке сырья в реакторах, вращающихся со скоростью 1395 об/мин.

Исследование влияния условий механоактивации на антиоксидантные свойства водно-спиртовых экстрактов, выделенных из коры осины. Кинетические параметры антиоксидантов водно-спиртовых экстрактов коры осины определяли модифицированным кинетическим методом на основе модельной реакции инициированного окисления кумола с добавлением диметилсульфоксида. Для скрининговых исследований выбран ряд образцов, полученных при частоте вращения реакторов 1395 и 1820 об/мин в течение 1–10 мин. Результаты определения антиоксидантов представлены в таблице 4 и на рисунках 8 и 9.

Анализ антиоксидантной активности водно-спиртовых экстрактов коры осины выявил значимое влияние режимов предшествующей механоактивации сырья.

Экстракт из нативного (необработанного) сырья показал относительно низкую антиоксидантную активность, характеризующуюся наличием одного типа антиоксидантов с содержанием 0,76 ± 0,01 моль/кг. Кинетика инициированного окисления модельного субстрата (кумола) в его присутствии демонстрирует период индукции (20 мин) и низкую константу скорости окисления, что свидетельствует о невысокой реакционной способности присутствующих ингибиторов.

Механоактивация приводит к существенной трансформации антиоксидантного профиля. Уже после 1 мин обработки общее содержание антиоксидантов возрастает до 1,15 ± 0,02 моль/кг, а в экстракте появляется второй тип ингибиторов. Максимальное содержание антиоксидантов (1,66 ± 0,03 моль/кг) и наибольший период индукции (90 мин) достигаются после 5 мин обработки при скорости вращения 1820 об/мин. Дальнейшее увеличение времени активации приводит к снижению антиоксидантной активности, что связано с деградацией термолабильных соединений при длительном механическом воздействии.

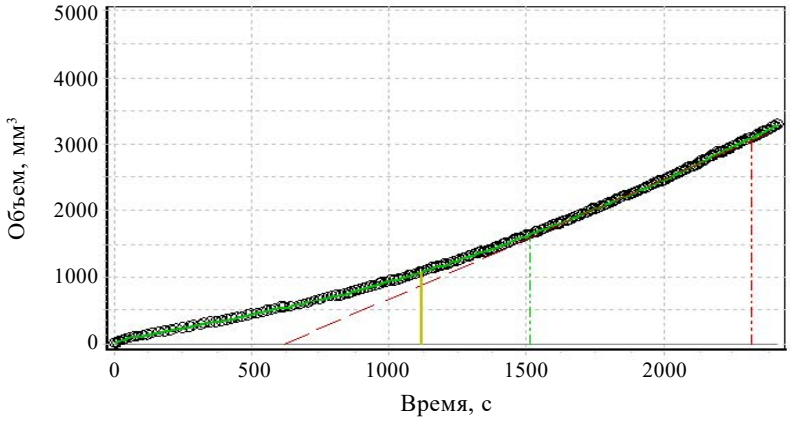


Рисунок 8. Кинетическая кривая поглощения кислорода кумолом в присутствии водно-спиртового экстракта необработанной коры осины (механоактивация в течение 5 мин)

Figure 8. Oxygen absorption by cumin in the presence of water-alcohol extract of untreated aspen bark after 5 min of mechanical activation

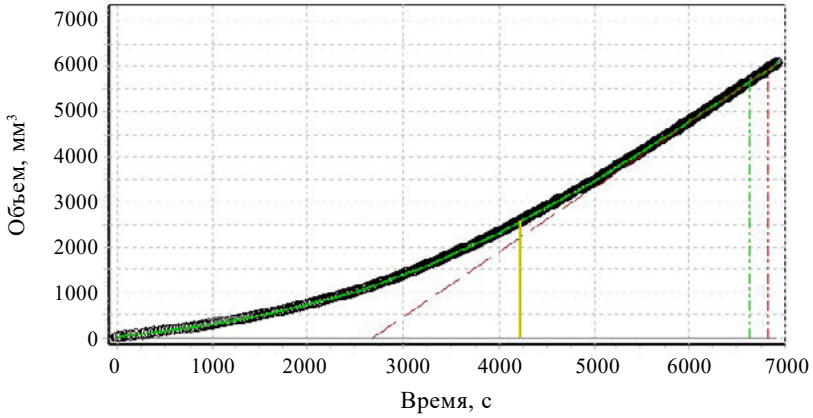


Рисунок 9. Кинетическая кривая поглощения кислорода кумолом в присутствии водно-спиртового экстракта коры осины (механоактивация в течение 5 мин)

Figure 9. Oxygen absorption by cumin in the presence of water-alcohol extract of aspen bark after 5 min of mechanical activation

Во всех экстрактах из механоактивированного сырья идентифицированы два типа антиоксидантов, различающихся реакционной способностью. При этом количественно преобладает менее активный тип.

Несмотря на увеличение общего пула антиоксидантов, значения констант скорости окисления для всех исследованных образцов остаются в области низких величин (табл. 4). Это указывает на то, что основными ингибиторами окисления в экстрактах коры осины являются слабые антиоксиданты, эффективность которых определяется скорее высоким общим содержанием, чем высокой индивидуальной активностью.

Таким образом, механоактивация коры осины является эффективным методом интенсификации экстракции антиоксидантных компонентов и увеличения их суммарного выхода, однако существенно не меняет природу доминирующих ингибиторов, характеризующихся низкой удельной реакционной способностью.

Выводы

Электронно-микроскопические исследования показали, что минимальный размер частиц после механоактивации сырья составляет 55 нм. Количество частиц диаметром 98 нм, полученных при обработке в течение 5 мин при разных скоростях реакторов, практически одинаково.

Механоактивация сырья при разных условиях существенно увеличивает выход полифенолов (прирост до 61,5 %). Количество водно-спиртовых веществ также возрастает на 40–44 % при диспергировании в течение 5–10 мин и скорости вращения реакторов 1820 об/мин.

В большей степени механоактивация коры осины влияет на экстракцию водорастворимых веществ. Максимальный выход получен при механоактивации сырья в планетарной мельнице в течение 3–5 мин при скоростях вращения реакторов 1395 и 1820 об/мин. Дальнейшее увеличение времени механического воздействия снижает количество извлеченных водорастворимых веществ и сопровождается ростом затрат на производство биологически активных веществ.

Наибольший выход салицина при механоактивации сырья в течение 1–3 мин получен в реакторах, вращающихся со скоростью 1820 об/мин. Дальнейшее увеличение времени обработки (до 5, 7 и 10 мин) не способствует повышению количества извлекаемого салицина. Независимо от времени диспергирования сырья и скорости вращения реакторов его значение остается постоянным. При механоактивации сырья в реакторах со скоростью 1395 об/мин в течение 1–3 мин выход салицина ниже, чем при скорости 1820 об/мин. При времени обработки 5–10 мин количество извлекаемого салицина остается одинаковым.

По данным инфракрасной спектроскопии, механоактивация сырья даже при минимальной скорости вращения оказывает существенное влияние на состав водорастворимых веществ. Диспергирование коры осины в течение 3 мин приводит к значительному повышению доли углеводной составляющей и гидроксильных групп. При этом уменьшается количество алкильных заместителей. Увеличение содержания кислородсодержащих групп связано с окислением радикалов, образующихся при механоактивации.

Изменения функционального состава водорастворимых веществ из коры осины, обработанной при 1820 об/мин, аналогичны изменениям при обработке сырья в реакторах, вращающихся со скоростью 1395 об/мин.

Механоактивация сырья усиливает антиоксидантные свойства водорастворимых веществ. Максимальное содержание антиоксидантов отмечено во фракциях, экстрагированных из коры осины, обработанной в течение 5 мин.

Таким образом, применение механоактивации сырья – коры *Populus tremula* L. – позволит решить ключевую технологическую проблему извлечения ценных биологически активных веществ из сложных по химической и структурной организации растительных матриц и, соответственно, более полно использовать возобновляемое растительное сырье, повышая комплексность и экологичность лесопользования.

С учетом достижений в области переработки минерального сырья дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию энергозатрат при переработке растительных материалов (в частности, коры *Populus tremula* L.) с целью определения технологически и экономически обоснованного предела ее измельчения.

Критерии авторства

В. П. Сергун – проведение экспериментальных исследований, верификация полученных данных. М. М. Шамова – руководство экспериментальными исследованиями. В. М. Позняковский – методология исследования и консультации в ходе эксперимента. И. Ю. Сергеева – поиск источников и написание рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

V.P. Sergun conducted the experimental studies and verified the obtained data. M.M. Shamova supervised the experimental studies. V.M. Poznyakovsky designed the research methodology and provided consultations. I.Yu. Sergeeva provided literary sources and wrote 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. 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

3. 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

4. Babich O, Larina V, Krol O, Ulrikh E, Sukhikh S, Gureev MA, Prosekov A, Ivanova S. *In vitro* study of biological activity of *Tanacetum vulgare* extracts. Pharmaceutics. 2023;15(2):616. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020616

5. Sukhikh S, Babich O, Prosekov A, Patyukov N, Ivanova S. Future of chondroprotectors in the treatment of degenerative processes of connective tissue. Pharmaceuticals (Basel). 2020;13(9):220. https://doi.org/10.3390/ph13090220

6. Babich O, Prosekov A, Zaushintsena A, Sukhikh A, Dyshlyuk L, Ivanova S. Identification and quantification of phenolic compounds of Western Siberia *Astragalus danicus* in different regions. Heliyon. 2019;5(8):e02245. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02245

7. Кожевников А. Ю., Шестаков С. Л., Сыпалова Ю. А. Вопросы структурной организации лигнина и перспективы его переработки. Химия растительного сырья. 2023. № 2. С. 5–26. [Kozhevnikov AYu, Shestakov SL, Sypalova YuA. Lignin: Structural organization and processing prospects. Chemistry of Plant Raw Materials. 2023;(2):5–26. (In Russ.)] https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211737

8. Куркин В. А. Актуальные аспекты стандартизации сырья и препаратов, содержащих фенольные соединения. Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств. 2022. Т. 12. № 2. С. 127–141. [Kurkin VA. Relevant aspects of standardisation of plant raw materials and herbal medicinal products containing phenolic compounds. The Bulletin of the Scientific Centre for Expert Evaluation of Medicinal Products. Regulatory Research and Medicine Evaluation. 2022;12(2):127–141. (In Russ.)] https://doi.org/10.30895/1991-2919-2022-12-2-127-141

9. Сёмушкин Д. Н., Зиганшин Б. Г., Сёмушкин Н. И., Дмитриев А. В., Максимов И. И. и др. Методы интенсификации процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья. Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 1. С. 78–88. [Semushkin DN, Ziganshin BG, Semushkin NI, Dmitriev AV, Maksimov II, *et al*. Methods for intensification of extraction processes biologically active substances from plant raw materials. Vestnik Kurganskoj GSHA. 2023;1: 78–88. (In Russ)] https://elibrary.ru/ZXPZCV

10. Николаева И. Г., Цибиктарова Л. П. Механоактивация растительного сырья пятилистника кустарникового и толокнянки обыкновенной с добавками. Вестник Бурятского государственного университета. Медицина и фармация. 2024. № 3. С. 65–70. [Nikolaeva IG, Tsibiktarova LP. Mechanical Activation of the Herbal Substances of Potentilla fruticosa and Arctostaphylos uva-ursi Shoots with Additives. Bulletin of Buryat State University. Medicine and Pharmacy. 2024;(3):65–70. (In Russ.)] https://doi.org/10.18101/2306-1995-2024-3-65-70

11. Krakowska-Sieprawska A, Kiełbasa A, Rafińska K, Ligor M, Buszewski B. Modern Methods of Pre-Treatment of Plant Material for the Extraction of Bioactive Compounds. Molecules. 2022;23:730. https://doi.org/10.3390/molecules27030730

12. Просин М. В., Бородулин Д. М., Сафонова Е. А., Головачева Я. С. Исследование эффективности экстрагирования в различных типах аппаратов при использовании растительного сырья чаги, корня копеечника,плодов шиповника. Вестник КрасГАУ. 2021. № 6. С. 170–175. [Prosin VM, Borodulin DM, Safonova EA, Golovacheva YaS. Study of the extraction efficiency in various types of apparatus using plant materials of chaga, kopeck root, rose hips. Bulletin of KrasSAU. 2021;(6):170–175 (In Russ.)] https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-6-170–175

13. El-Eskandarany MS. Mechanical alloying: Energy storage, protective coatings, and medical applications. Elsevier. New York: William Andrew; 2020. 441 p.

14. Matveeva AG, Skripkina TS, Nekrasov VM, Nikiforova UE, Bukhtoyarov VA, *et al.* Particle aggregation and the grinding limit in high energy ball mill. Powder Technology. 2024;449:120370. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120370

15. Zhu Zh, Gao Sh, Chen Ch, Xu W, Xiao P, *et al*. The natural product salicin alleviates osteoarthritis progression by binding to IRE1α and inhibiting endoplasmic reticulum stress through the IRE1α-IκBα-p65 signaling pathway. Experimental & Molecular Medicine. 2022;(11):1927–1939. https://doi.org/10.1038/s12276-022-00879-w

16. Jiang Y, Hou J, Liu C, Zhao C, Xu Y, *et al.* Inhibitory effect of salicin on *Staphylococcus aureus* coagulase. ChemMedChem. 2023;(22):e202300302. https://doi.org/10.1002/cmdc.202300302

17. Ahn S-Y, Kim KA, Lee S, Kim KH. Potential skin anti-aging effects of main phenolic compounds, tremulacin and tremuloidin from *Salix chaenomeloides* leaves on TNF-α-stimulated human dermal fibroblasts. Chemico-Biological Interactions. 20241;402:111192. https://doi.org/10.1016/j.cbi.2024.111192

18. Wu PQ, Li Y, Ren YH, Zhou JS, Liu QF, *et al*. Anti-inflammatory salicin derivatives from the barks of *Salix tetrasperma*. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2024;16. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c01061

19. Лоскутов С. Р., Шапченкова О. А., Анискина А. А., Пастори З. Гигроскопические свойства древесины лиственных пород. Лестной Вестник. 2022. Т. 26. № 2. С. 92–102. [Loskutov SR, Shapchenkova OA, Aniskina AA, Pastori Z. Hygroscopic properties of hardwoods. Forestry Bulletin. 2022;26(2):92–102. https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-92-102

20. 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. [Vardanyan LR, Harutyunyan SA, Torosyan GO. 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

21. Manousi N, Rosenberg E, Deliyanni E, Zachariadis GA, Samanidou V. Magnetic solid-phase extraction of organic compounds based on graphene oxide nanocomposites. Molecules. 2020;25(5):1148. https://elibrary.ru/ZIXMDZ

22. Лапшин О. В., Болдырева Е. В., Болдырев В. В. Роль смешения и диспергирования в механохимическом синтезе (обзор). Журнал неорганической химии. 2021. Т. 66. № 3. С. 402–424. [Lapshin OV, Boldyreva EV, Boldyrev VV. The role of mixing and dispersion in mechanochemical synthesis (review). Journal of Inorganic Chemistry. 2021;66(3):402–424. (In Russ.)] https://doi.org/10.31857/S0044457X21030119

23. Jiang W, Adamopoulos S, Hosseinpourpia R, Žigon J, Petric M, *et al.* Utilization of partially liquefied bark for production of particleboards. Applied Sciences. 2020;10:5253. https://doi.org/10.3390/app10155253

24. Sillero L, Prado R, Labidi J. Simultaneous microwave-ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from bark. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2020;156:108100. https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108100

25. Валеев К. В., Зиатдинова Д. Ф., Сафин Р. Г. Обзор исследований в области извлечения биологически активных веществ из хвойных пород древесины. Системы. Методы. Технологии. 2024. № 4. С. 159–164. [Valeev KV, Ziatdinova DF, Safin RG. Review of research in the field of extraction of biologically active substances from coniferous wood species. Systems. Methods. Technologies. 2024;(4):159–164. (In Russ.)] https://doi.org/10.18324/2077-5415-2024-4-159-164

26. Elbendari AM, Ibrahim SS. Optimizing key parameters for grinding energy efficiency and modeling of particle size distribution in a stirred ball mill. Scientific Reports. 2025;15(1):3374. https://doi.org/10.1038/s41598-025-87229-8

27. Soares WS, Magalhães EdS, Govender N. Enhancing particle breakage and energy utilization in ball mills: An integrated DEM and SPH approach. Mining. 2025;5:18. https://doi.org/10.3390/mining5010018

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Сергун Валерий Петрович / Valery P. Sergun ORCID 0009-0003-6368-9992; eLIBRARY SPIN 7538-0687
Шамова Мария Михайловна / Maria M. Shamova ORCID 0000-0001-7257-8838; eLIBRARY SPIN 7560-5507
Позняковский Валерий Михайлович / Valery M. Poznyakovsky ORCID 0000-0001-7034-4675; eLIBRARY SPIN 6416-0515
Сергеева Ирина Юрьевна / Irina Yu. Sergeeva ORCID 0000-0002-1686-0131; eLIBRARY SPIN 4207-9166