

ИЗВЛЕЧЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОРЫ ОСИНЫ (*POPULUS TREMULA L.*) СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА

Л.Ю. Ярулин — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. ORCID: 0000-0003-1371-6721. Эл. почта: yarul.lenar@gmail.com (для переписки)

С.А. Коваленко — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. ORCID: 0000-0002-1728-8819. Эл. почта: svetlanakov25@gmail.com

Я.Ю. Корепанова — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. ORCID: 0009-0002-3357-4142. Эл. почта: yaroslava2900@mail.ru

И.М. Абдулагатов — Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики, филиал ОИВТ РАН, г. Махачкала, Россия; Дагестанский государственный университет, г. Махачкала, Россия. ORCID: 0000-0002-6299-5280. Эл. почта: ilmutdina@gmail.com

В.Ф. Хайрутдинов — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. ORCID: 0000-0002-8137-6450. Эл. почта: kvener@yandex.ru

М.А. Сысоева — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. ORCID: 0000-0003-1535-8497. Эл. почта: sysoevama@corp.knrtu.ru

Л.З. Шарафутдинова — Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. ORCID: 0009-0004-6472-3459. Эл. почта: ls341240@gmail.com

© 2025 г. Поступила в редакцию 24.07.2025 г. Прошла рецензирование 01.11.2025 г.
Принята к публикации 01.11.2025 г.

Методом сверхкритической (СК) флюидной экстракции диоксидом углерода при температуре 313,15 и 333,15 К и давлениях от 15 до 35 МПа получены экстракты коры осины обыкновенной *Populus tremula L.* Методом хромато-масс-спектрометрии был определен компонентный состав CO₂-экстракта *Populus tremula L.*, в котором выявлено значительное количество жирных кислот и их эфиров. Установлено, что традиционная жидкостная экстракция петролейным эфиром значительно менее эффективна по сравнению с экстракцией СК-CO₂ с точки зрения содержания в конечном продукте стероидных и тритерпеноидных компонентов коры *Populus tremula L.*

Ключевые слова: *Populus tremula L.*, кора осины, сверхкритическая флюидная экстракция, диоксид углерода, компонентный состав.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема эффективного использования отходов деревообрабатывающей промышленности становится все более актуальной в свете ужесточения экологического законодательства. Значительную часть сырья, составляющую до 50 % от общего объема заготавливаемой древесины, включая ветви, листья, кору и

некондиционную древесину, традиционно отправляют на свалку или используют крайне неэффективно, например в качестве низкокалорийного топлива или просто сжигают без утилизации тепла. Это приводит к значительным экологическим и экономическим потерям: загрязнению почвы и атмосферы, нерациональному расходованию потенциально ценного сырья и упущенной выгоде для предприятий.

Между тем, эти «отходы» представляют собой богатейший источник ценных химических соединений, которые могут найти широкое применение в фармацевтике, косметологии, производстве биотоплива, кормовых добавок и даже биоразлагаемых материалов. Например, кора, листья и почки деревьев содержат уникальные биологически активные вещества, обладающие антиоксидантными, противовоспалительными и антимикробными свойствами [1].

Особый интерес в этом контексте представляет осина обыкновенная (*Populus tremula L.*) семейства ивовых (*Salicaceae*) рода тополь (*Populus*), прорастающая на всей территории России и имеющая большие сырьевые запасы. Полезные свойства коры осины известны еще с древних времен. В народной медицине ее использовали для лечения воспалительных процессов, ран и лихорадки. Современные исследования подтверждают, что в коре осины содержится целый комплекс биологически активных соединений: ароматические и жирные кислоты; дубильные вещества; углеводы и фенолгликозиды, в частности салицин — природный аналог ацетилсалициловой кислоты (аспирина), который входит в состав современных противовоспалительных и жаропонижающих препаратов [2—12]. Переработка отходов деревообработки, в частности коры, почек и листьев осины, открывает новые возможности для создания экологически чистых и экономически выгодных технологий. Внедрение таких решений позволит не только снизить нагрузку на окружающую среду, но и получить дополнительную прибыль за счет выпуска продукции с высокой добавленной стоимостью.

В литературе преимущественно приводятся данные по экстракции коры осины *Populus tremuloides*, широко распространенной в Северной Америке, которая относится к роду *Populus* и имеет сходные характеристики с *Populus tremula L.*, но имеет морфологические отличия. Так, в исследовании [13] водная экстракция *Populus tremuloides* показала наличие полифенолов в полученных экстрактах, а фракционирование неочищенных водных экстрактов коры с использованием органических растворителей позволило усилить антиоксидантные свойства продуктов. В работе [14] были изучены экстракты этого вида, полученные с использованием воды и различных органических растворителей, для оценки антимикробной активности компонентов коры. В результате анализа в водных и метанольных экстрактах было идентифицировано 92 соединения, преимущественно полифенолы, 22 из которых ранее были известны своими антимикробными свойствами. В исследовании [15] приведены результаты химического анализа твердых остатков после экстракции *Populus tremuloides* метанолом в сверхкритическом (СК) состоянии. В работе [16] широкий спектр фенольных соединений, жирных кислот, флавоноидов, стеролов и тритерпенов, а также липидов и восков был обнаружен в экстрактах *Populus tremuloides*, полученных экстракцией ацетоном в аппарате Сокслета.

Объект данного исследования — кора осины *Populus tremula L.*, ареал произрастания которой охватывает значительные территории Европы, Азии и Северной Африки. В России она встречается практически повсеместно, от

арктической тундры до лесостепной зоны. В работе [17] представлены результаты экстракции коры *Populus tremula L.* *n*-гептаном, метанолом и смесью метанола с водой с последующей оценкой их антиоксидантной и антибактериальной активности. В другом исследовании [18] экстракция водой, стимулированная микроволновым излучением, позволила выделить из *Populus tremula L.* биологически активные фенолгликозиды, включая салицин и его производные.

За последнее десятилетие метод сверхкритической флюидной экстракции (СКФ-экстракции) доказал свою эффективность в выделении как полярных, так и неполярных соединений из растительного сырья [19–24]. В более чем 90 % случаев СКФ-экстракции растительных материалов в качестве сверхкритического растворителя применяют диоксид углерода. Это связано с его низкими критическими параметрами, безопасностью (нетоксичен и невзрывоопасен), доступностью, низкой стоимостью и простотой удаления из готового экстракта [25–27]. Несмотря на перспективность коры *Populus tremula L.* как источника биологически активных веществ, СКФ-экстракция ее компонентов диоксидом углерода до сих пор не описана в научной литературе, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований в этой области.

Цель данной работы — получение СКФ-экстракта коры осины (*Populus tremula L.*), оценка выхода экстракта при различных температурах и давлениях, определение компонентного состава экстрактов, сравнение содержания стероидных и тритерпеноидных соединений в образцах экстрактов, полученных при экстракции СК-СО₂ и традиционным методом жидкостной экстракции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы

Сырье и реактивы. В работе была использована высушенная кора *Populus tremula L.* (сбор 2024 г. в Иркутской обл.), приобретенная в компании ООО «Шалфей» (Иркутск, Россия), и диоксид углерода («Техгазсервис», Казань, Россия; чистота 99,0 %). Измельчение коры осуществляли на лабораторной мельнице до размера частиц 0,5–2 мм. Перед экстракцией образцы сушили в сушильном шкафу при температуре 323,15 К. Влажность сырья, определенная гравиметрическим методом, составляла 5 %.

СКФ-экстракция. Процесс СКФ-экстракции проводили с использованием лабораторной экстракционной системы SFE-1000 («Waters Corp.», США). Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Она состоит из системы подачи экстрагента (СК-СО₂), экстрактора (5) объемом 200 мл, устройств вывода экстракта и систем управления и контроля. Сжатие жидкого СО₂ происходит в двух рабочих камерах плунжерного насоса (3); для этого в камеры по специальным гибким трубкам из холодильника (2) подавали охлаждающую жидкость (антифриз) с температурой 268,15 К, достаточной для перевода СО₂ в жидкое состояние.

Экстрактор снабжен специальными микронными фильтрами для предотвращения механического уноса сырья в процессе экстракции. Нагрев потока СО₂, поступающего в экстрактор с исследуемым сырьем, осуществляли с помощью теплообменника (4). Для поддержания необходимой температуры процесса экстракции экстрактор снабжен нагревательной рубашкой (6). Контроль давления жидкости в системе обеспечивает автоматический регулятор давления

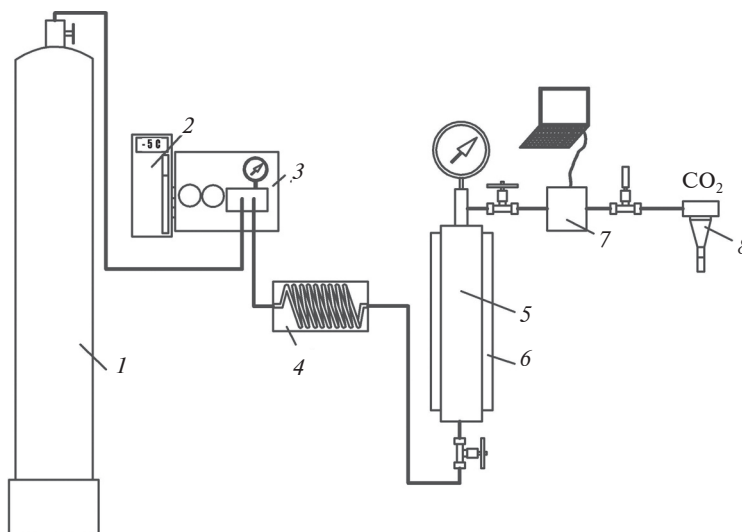


Рис. 1. Схема экспериментальной установки СКФ-экстракции:

1 — баллон с CO_2 ; 2 — холодильник; 3 — насос; 4 — теплообменник; 5 — экстрактор; 6 — нагревательная рубашка; 7 — регулятор давления; 8 — сепаратор

АВРР (7), расположенный между экстрактором (5) и сепаратором (8). Регулятор представляет собой линейный игольчатый клапан, шток которого управляется электродвигателем. Встроенный датчик давления обеспечивает обратную связь для управления положением штока и поддержания заданного давления. Регулятор давления также осуществляет подогрев выходного потока для частичной компенсации падения температуры при резком расширении CO_2 . Экспериментальная установка позволяет проводить исследования с расходом CO_2 до 200 г/мин.

Известно, что эффективность экстракции зависит от степени измельчения исходного сырья. В связи с этим перед проведением экспериментов сырье измельчали на лабораторной мельнице до размера частиц 0,5–2,0 мм. Пробу измельченной коры массой 65 г, взвешенную на электронных весах, помещали в экстрактор (5) и обрабатывали в потоке СК- CO_2 10 г/мин. После 240 мин экстракции экстракт отделяли от растворителя путем снижения давления и температуры в сепараторе (8).

Растворяющая способность СК- CO_2 зависит от температуры и давления, что влияет на выход целевых компонентов. Параметры экстракции подбирают, исходя из состава сырья. Обычно используют температуры 308,15–333,15 К, поскольку при более высоких значениях термолабильные соединения, содержащиеся в экстракте, могут разрушаться. Повышение давления увеличивает растворяющую способность СК- CO_2 , но чрезмерное давление снижает селективность из-за усиления сольватации. Исходя из этого, в данной работе были приняты следующие параметры экстракции: температура 313,15 и 333,15 К и давление 15, 20, 30 и 35 МПа.

Массовый выход экстракта определяли взвешиванием на электронных весах («Vibra AF-R220CE», Япония) с точностью до 0,001 г. Относительный (в процентах) выход экстракта рассчитывали по отношению к массе сырья, загруженного в экстрактор.

ГХ/МС-анализ экстрактов проводили на приборе с масс-селективным детектором Agilent 7890/5975. Режим хроматографирования: температура инжектора 290 °С; температура детектора 250 °С; скорость подачи газа-носителя (гелий чистоты 99,9999 %) 3 мл/мин. Режим детектирования — без деления потока; электронная ионизация 70 эВ. Капиллярная колонка неполярная DB-35ms, длина 30 м, диаметр 250 мкм; фаза — 35 %-фенилметилполисилоксана, толщина слоя фазы 0,25 мкм. Режим нагрева термостата колонки: 50 °С — 1 мин, далее — 7 град/мин до 310 °С, изотерма — 2 мин. Идентификацию компонентов проводили с использованием библиотеки масс-спектров NIST-11.

Содержание тритерпеноидных соединений в экстрактах определяли спектрофотометрическим методом по изменению оптической плотности раствора на длине волны 550 нм после реакции с ванилиновым реактивом [28] на спектрофотометре (ПЭ-5300ви, Россия). Общее содержание тритерпеноидов С оценивали по концентрационной кривой ланостерола (ABCR, CAS 79-63-0) и выражали в мг-экв/г экстракта по формуле:

$$C = c \cdot V/m,$$

где c — концентрация тритерпеноидов, определенная по концентрационной кривой, мг/мл, V — объем отобранной для анализа пробы, мл; m — масса экстракта, взятого для анализа, г. Далее проводили перерасчет на 1 г абсолютно сухого сырья.

Аналогично определяли суммарное содержание стероидных соединений по реакции с хлоридом железа(III) в присутствии этилацетата и концентрированной серной кислоты с использованием в качестве стандарта для построения калибровочной кривой ситостерола (ACROS ORGANIC, CAS 83-46-5) на длине волны 560 нм [29]. Статистическую обработку экспериментальных результатов проводили с использованием программы Statistica 10.0.

Эффективность СКФ-экстракции оценивали сравнением содержания стероидных и тритерпеноидных соединений в CO₂-экстрактах с их содержанием в экстрактах, полученных традиционным методом — обработкой петролейным эфиром (с температурой кипения 40–60 °С) в соотношении 1 : 10 в течение 1 ч при температуре 318 ± 2 К. Полученный этим методом экстракт упарили под вакуумом на роторном испарителе. Выход экстрактивных веществ в этом случае составил в среднем 3 г / 100 г сырья.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены значения выхода экстракта после 240 мин СКФ-экстракции при различных параметрах. Как видно из диаграммы, выход экстракта возрастает с ростом температуры и давления и достигает 10,3 % при 333,15 К и 35 МПа.

Методом хромато-масс-спектрометрии был определен компонентный состав трех CO₂-экстрактов *Populus tremula L.*, полученных при 313 К и давлении от 15 до 30 МПа. Выбор данных объектов обусловлен тем, что более высокие температура и давление могут негативно повлиять на извлекаемые биологически активные соединения. Хроматограмма экстрактов представлена на рис. 3. Показано, что пики на хроматограммах всех трех экстрактов по временам удерживания практически идентичны, что свидетельствует об идентичности их качественного состава. При этом количество идентифицированных

Вкладка к статье Л.Ю. Яруллина, С.А. Коваленко, Я.Ю. Корепановой, И.М. Абдулагатова, В.Ф. Хайрутдинова, М.А. Сысоевой, Л.З. Шарафутдиновой «Извлечение биологически активных соединений из коры осины (*Populus tremula L.*) сверхкритическим диоксидом углерода»

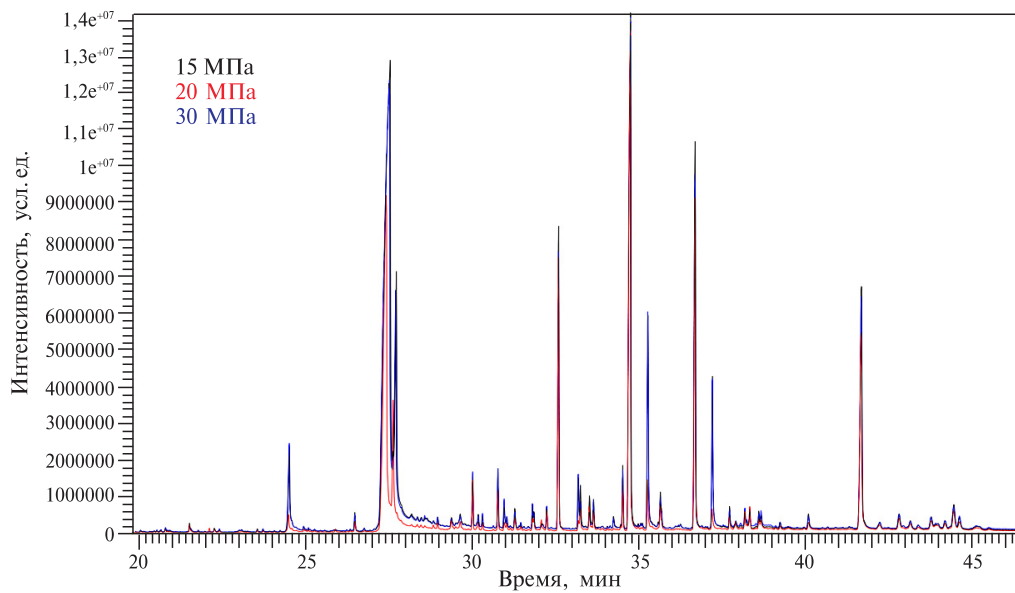


Рис. 3. Хроматограмма суммы липофильных соединений экстракта *Populus tremula L.*, полученных методом СКФ-экстракции при 313,15 К и различных давлениях

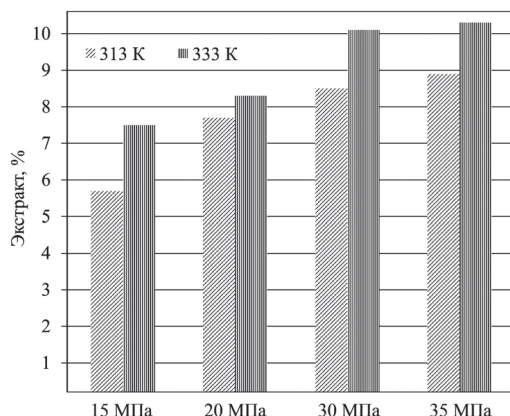


Рис. 2. Выход экстракта, полученного методом СКФ-экстракции в течение 240 мин при различных параметрах состояния

соединений в этих экстрактах различно, поскольку интенсивности пиков некоторых соединений отличаются. Наибольшая интенсивность пиков наблюдается у экстракта, полученного при 313 К и 30 МПа; компонентный состав, входящих в него липофильных соединений, представлен в табл. 1.

Методом внутренней нормализации (по площадям пиков на хроматограмме) в образце выявлено значительное количество жирных кислот и их эфиров, представленных в основном линолевой, линоленовой, пальмитиновой и стеариновой кислотами, а также их производными. Следует отметить преобладание ненасыщенных кислот, которые играют важную роль в формировании клеточных мембран и обладают антибактериальными свойствами [30]. Около 29 % веществ экстракта представлены алифатическими и циклическими спиртами, которые, вероятно, являются компонентами эфирных масел и участвуют в формировании специфического запаха.

Среди найденных соединений присутствуют сесквитерпены в количестве 0,49 % от суммы обнаруженных в экстракте веществ. Согласно литературным данным, сесквитерпены являются основными компонентами эфирных масел и обладают антибактериальной, противогрибковой, противовоспалительной и антиоксидантной активностью, что важно для оценки биологической ценности образца [31]. В составе экстракта найдены предшественник стероидных и тритерпеноидных соединений — сквален, стероидные соединения (7,69 %), включая преобладающий ситостерол и его производные, а также тритерпеноиды двух групп (2,85 %): тетрациклические (представленные производными ланостерола) и пентациклические (представленные бетулином, производными олеанана, урсана и лупана) и их предшественники. Идентифицированные соединения известны своими антиоксидантными, противовоспалительными, противоопухолевыми и антимикробными свойствами [32–35]. Кроме того, обнаружены витамин Е и его восстановленная форма — токоферолгидрохинон, общее содержание которых составляет 4,57 %, что указывает на выраженную антиоксидантную активность экстракта [36].

При сопоставлении хроматограмм трех экстрактов установлено, что экстракт, полученный при 313,15 К и 20 МПа содержит меньше жирных кислот (пальмитиновой, стеариновой, линолевой и линоленовой), сквалена, витамина Е и токоферолгидрохинона. Интенсивность пиков, соответствующих стероидным и тритерпеноидным соединениям, визуально не отличаются.

Таблица 1

Компонентный состав CO₂-экстракта *Populus tremula L.*, полученного при температуре 313 К и давлении 30 МПа

Вещество	Время удерживания, мин	Относительное содержание, %
Жирные кислоты и их эфиры		
Гексановая (капроновая) кислота	7,155	0,08
Метилвый эфир гексадекановой кислоты	23,811	0,09
Гексадекановая (пальмитиновая) кислота	24,598	2,21
Метилвый эфир октадекановой (стеариновой) кислоты	26,560	0,54
Метил (Z)-5,11,14,17-эйкозатетраеноат	26,844	0,09
Линолевая кислота	27,605	11,66
9,12,15-Октадекатриеновая (линоленовая) кислота	27,799	6,42
1-Метилбутилпальмитат	28,436	0,41
6,9,12,15-Докозатетраеновая кислота, метилвый эфир	29,591	0,27
8,11,14-Эйкозатриеновая кислота	29,717	0,43
11-Эйкозеновая кислота	29,729	0,45
Этиловый эфир линолевой кислоты	30,846	1,55
Этиловый эфир линоленовой кислоты	31,113	0,46
2-Гидрокси-1-(гидроксиметил) этиловый эфир 9,12-октадекадиеновой кислоты	31,352	0,63
2,3-Дигидроксипропиловый эфир 9,12-октадекадиеновой кислоты	31,533	0,27
14-Трикозенилформиат	31,624	0,09
Генэйкозиловый эфир муравьиной кислоты	33,252	1,50
Изопропил линолеат	34,206	0,18
Углеводороды, спирты, альдегиды и кетоны		
2-Метилциклогексанон	9,905	0,25
1,2-Циклогександиол	10,241	0,30
2,4-Декадиеналь	14,928	0,30
2,6-Диметил-6-(4-метил-3-пентил)-бициклогекта-2-ен	15,612	0,80
3-(1,5-Диметил-4-гексенил)-6-метилен-циклогексен	16,477	0,40
3,7,11,15-Тетраметил-2-гексадецен-1-ол	21,610	0,40
Гептадекан	26,422	0,30
Докозан	27,705	4,86
Генэйкозан	30,091	1,60
1-Докозен	29,042	0,01

*Извлечение биологически активных соединений
из коры осины (*Populus tremula L.*) сверхкритическим диоксидом углерода*

Окончание таблицы 1

Вещество	Время удерживания, мин	Относительное содержание, %
Октадеканаль	32,661	7,20
Эйкозано́л	31,034	1,10
Тетракоза́нол	35,338	5,60
Триако́нтандио́л	36,747	9,00
1,3,12-Нонадекатриен-5,14-дио́л	34,811	12,30
Сквален	34,584	1,63
Сесквитерпены		
α -Кубебене	14,586	0,11
τ -Кадино́л	20,546	0,07
α -Кадино́л	20,633	0,08
Плата́мбин	25,031	0,14
Декагидро-1,1,7-триметил-4-метилен-1 <i>H</i> -циклопроп[е]азулен	16,695	0,09
Стероидные соединения		
Производное стигмастерола	37,971	0,19
Стигмаст-5-ен-3-о́ла олеат	38,389	0,27
Ситостеро́л	41,728	6,14
Ситостеро́ла ацетат	42,283	0,27
Цитрост-7-ен-3-о́л	43,830	0,41
γ -Ситостенон	44,670	0,41
Тритерпеноиды		
Производное ланостерола	42,861	0,46
9,19-Циклола́ност-24-ен-3-о́л	43,443	0,19
24-Метилен-9,19-циклола́ностан-3-о́л	44,237	0,32
Производное ланостерола	44,499	0,72
Бету́лин	39,267	0,27
α -Ами́рин	41,428	0,25
Олеан-12-ен-3-о́н	43,994	0,28
Лупа-13(18),22-диен-3-о́л, ацетат	44,887	0,11
3-(Ацети́локси)-мети́ловый эфир олеан-12-ен-28-оино́вой кислоты	49,700	0,20
3-Ацети́локси-урс-12-ен-28-а́ль	51,437	0,11
Вита́мин Е	37,287	3,89
Токофе́ролгидрохино́н	37,827	0,68

Для количественной оценки содержания соединений стероидной и три-терпеноидной структур использовали спектрофотометрический метод, в основе которого лежит окисление анализируемых соединений с образованием окрашенных ненасыщенных продуктов (табл. 2 и 3).

Анализ данных из табл. 2 показывает, что общая концентрация стероидов в СКФ-экстрактах варьируется от 0,31 до 0,52 % со средним значением 0,41 %. Наибольшее количество стероидов обнаружено в образцах, полученных при 333,15 К и давлениях 30 и 35 МПа. Это позволяет предположить, что рост температуры и давления усиливает экстракцию стероидных соединений.

Таблица 2

Содержание стероидных соединений в экстрактах

Параметры экстракции			Содержание в экстракте, %	Содержание, % от сырья
экстрагент	температура, К	давление, МПа		
СК-СО ₂	313,15	15	0,362±0,020	0,020±0,001
СК-СО ₂	313,15	20	0,339±0,021	0,026±0,002
СК-СО ₂	313,15	30	0,401±0,043	0,035±0,005
СК-СО ₂	313,15	35	0,360±0,080	0,039±0,005
СК-СО ₂	333,15	15	0,313±0,052	0,012±0,002
СК-СО ₂	333,15	20	0,488±0,081	0,043±0,006
СК-СО ₂	333,15	30	0,508±0,044	0,046±0,001
СК-СО ₂	333,15	35	0,525±0,070	0,043±0,005
Петролейный эфир	318±2	атмосферное	0,14±0,04	0,0042±0,00

Таблица 3

Содержание тритерпеноидных соединений в экстрактах

Параметры экстракции			Содержание в экстракте, %	Содержание, % от сырья
экстрагент	температура, К	давление, МПа		
СК-СО ₂	313,15	15	0,33±0,06	0,019±0,002
СК-СО ₂	313,15	20	0,20±0,04	0,016±0,002
СК-СО ₂	313,15	30	0,22±0,03	0,019±0,001
СК-СО ₂	313,15	35	0,28±0,06	0,031±0,002
СК-СО ₂	333,15	15	0,35±0,04	0,014±0,001
СК-СО ₂	333,15	20	0,31±0,04	0,028±0,002
СК-СО ₂	333,15	30	0,20±0,03	0,018±0,001
СК-СО ₂	333,15	35	0,24±0,08	0,020±0,003
Петролейный эфир	318±2	атмосферное	0,12±0,02	0,0036±0,001

Минимальные значения зафиксированы при 313,15 К и 20 МПа, а также при 333,15 К и 15 МПа, что указывает на сниженную эффективность процесса при низких значениях одного из параметров. Кроме того, при 313,15 К давление оказывает менее выраженное влияние на выход стероидов, тогда как при 333,15 К наблюдается четкая зависимость: чем выше давление, тем больше выход.

Согласно данным, представленным в табл. 3, общее содержание тритерпеноидов в экстрактах ниже содержания стероидов и колеблется от 0,20 % до 0,35 %, среднее значение составило 0,26 %. При этом наивысшее содержание тритерпеноидов в экстракте зафиксировано в образцах, которые были получены при низком давлении 15 МПа, как при температуре 313,15 К, так и при температуре 333,15 К. Отмечено, что при температуре 333,15 К и давлениях 15 и 20 МПа, содержание тритерпеноидов в экстракте практически одинаково (в пределах погрешности), однако при пересчете на сырье видно, что более высокое давление позволяет извлечь в 2 раза больше этих соединений. Повышенные давления до 35 МПа при низкой температуре приводит к улучшению экстракции целевых соединений, а при высокой температуре — к значительному снижению их выхода.

Для сравнения, традиционная экстракция петролейным эфиром демонстрирует значительно более низкие показатели по содержанию стероидных соединений и тритерпеноидов в экстракте (0,14 и 0,12 %, соответственно) по сравнению с другими образцами, что говорит о более низкой ее эффективности для выделения этих групп соединений.

Отметим, что данные по количественному спектрофотометрическому анализу стероидных и тритерпеноидных соединений дают существенно меньшее их содержание по сравнению с данными, полученными полуколичественным методом внутренней нормализации. Вероятно, это связано с особенностью строения соединений данных классов, например наличием дополнительных функциональных групп, затрудняющих протекание специфической реакции с ванилином или хлоридом железа, что и дает заниженный результат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало наличие широкого спектра биологически активных соединений в составе СКФ-экстракта коры *Populus tremula L.*, полученного при 313,15 К и различных давлениях. Установлено, что изменение давления экстракции не влияет на качественный состав экстрактов, но влияет на количественное распределение соединений. Максимальный выход экстракта (10,3 %) достигнут при 333,15 К и 35 МПа, что связано с увеличением растворяющей способности CO_2 для компонентов коры *Populus tremula L.* при высоких температуре и давлении.

Наибольшее содержание тритерпеноидов наблюдалось при давлении 15 МПа независимо от температуры (313,15 и 333,15 К). Повышение давления до 30 МПа и температуры приводило к снижению выхода, вероятно, из-за снижения селективности экстракции. Для стероидных соединений наилучшие результаты получены при 333,15 К и 30—35 МПа, тогда как низкие давление (15 МПа) или температура (313,15 К) снижали их выход.

Хромато-масс-спектрометрический анализ выявил значительное содержание жирных кислот (32,74 %), стероидов (3,88 %), тритерпеноидов (2,85 %)

и витамина Е (4,57 %), что определяет антиоксидантную, противовоспалительную и антимикробную ценность экстракта.

Традиционная экстракция петролейным эфиром оказалась менее эффективной по сравнению с экстракцией СК-СО₂ в отношении содержания в экстракте как тритерпеноидов (0,12 %), так и стероидов (0,14 %).

Полученные данные подтверждают преимущество СКФ-экстракции перед традиционными методами и подчеркивают важность оптимизации условий процесса для повышения эффективности выделения биологически активных веществ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00 (Сверхкритические флюидные технологии в переработке полимеров (FZSG-2023-0007)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang J., Yang L., Liu H. // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 3929.
2. Cantarella M., Cantarella L., Gallifuoco A., Spera A., Alfani F. // Biotechnol. Prog. 2004. Vol. 20. P. 200.
3. Abreu I.N., Ahnlund M., Moritz T., Albrechtsen B.R. // J. Chem. Ecol. 2011. Vol. 37. P. 857.
4. Kim J.K., Bae Y-S. // Holzforschung. 2009b. Vol. 63. No 3. P. 315.
5. Si C-L., Xu J., Kim J-K., Bae Y-S., Liu P-T, Liu Z. // Wood Sci Technol. 2011. Vol. 45. P. 5. DOI: 10.1007/s00226-009-0286-x
6. Jeon S.M., Kim H.K., Kim H.J., Do G.M., Jeong T.S., Park Y.B. // Transl. Res. 2007. Vol. 149. No 1. P. 15.
7. Saito T., Abe D., Sekiya K. // Biochem. Biophys. Res. Commun. 2008. Vol. 372. P. 835.
8. Pichette A., Eftekhari A., Georges P., Lavoie S., Mshvildadze V., Legault J. // Can. J. Chem. 2010. Vol. 88. P. 104.
9. Амосова Е.Н., Зуева Е.П., Крылова С.Г. // Бюл. эксперим. биологии и медицины. 2000. Т. 129. С. 28.
10. Зуева Е.П., Фомина Т.И., Разина Т.Г. // Эксперим. и клинич. фармакология. 1999. Т. 62. № 1. С. 28.
11. Рассыпанова С.С., Турецкова В.Ф., Зверев Я.Ф. // Растит. ресурсы. 2010. Т. 46. № 3. С. 103.
12. Palo R.T. // J. Chem. Ecol. 1984. Vol. 10. P. 499.
13. Diouf P.N., Stevanovic T., Cloutier A. // Wood Sci Technol. 2009. Vol. 43. P. 457.
14. St-Pierre A., Blondeau D., Lajeunesse A., Bley J., Bourdeau N., Desgagne-Penix I. // Molecules. 2018. Vol. 23. P. 1739.
15. Ahmed A., Grandmaison J. L., Kaliaguine S. // J. Wood Chemistry and Technology. 1986. Vol. 6. P. 219.
16. Fernandez M.P., Watson P.A., Breuil C. // J. Chromatogr. A. 2001. Vol. 922. P. 225.
17. Hubert J., Angelis A., Aligiannis N., Rosalia M., Abedini A., Bakiri A. // Planta Med. 2016. Vol. 82. P. 1351.
18. Pals M., Lauberte L., Ponomarenko J., Lauberts M., Arshanitsa A. // Plants. 2022. Vol. 11. P. 1544.
19. Gil-Chavez G.J., Villa J.A., Ayala-Zavala J.F., Heredia J.B., Sepulveda D., Yahia E.M., Gonzalez-Aguilar G.A. // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2013. Vol. 12. No 1. P. 5.
20. Шамсетдинов Ф.Н., Гумеров Ф.М., Габитов Ф.Р., Зарипов З.И., Ремизов А.Б., Колядко И.М., Никитин В.Г., Фахреев А.К., Камалова Д.И. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2011. Т. 6. № 2. С. 83.

21. Рамазанов А.Ш., Балаева Ш.А. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2020. Т. 15. № 4. С. 49.
 22. Шахбанов К.Ш., Абдулагатов И.М., Алиев А.М. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2021. Т. 16. № 3. С. 42.
 23. Павлова Л.В., Платонов И.А., Куркин В.А., Афанасьева П.В., Новикова Е.А., Муханова И.М. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2018. Т. 13. № 4. С. 16.
 24. Сабирова Л.Ю., Яруллин Л.Ю., Хабриев И.Ш., Хайрутдинов В.Ф., Биалов Т.Р. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2024. Т. 19. № 2. С. 6.
 25. Бекетова А.Б., Касенова Ж.М. // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. 2012. № 4. С. 249.
 26. Gupta A., Naraniwal M., Kothari V. // Intern. J. Applied and Natural Sciences. 2012. Vol. 1. No 1. P. 8.
 27. Чернышев А.К., Гумеров Ф.М., Цветинский Г.Н., Яруллин Р.С., Иванов С.В., Левин Б.В., Шафран М.И., Жилин И.Ф., Бесков А.Г., Чернышев К.А. // Диоксид углерода: Свойства, улавливание (получение), применение. М.: Галлея-принт. 2013. 903 с.
 28. Сысоева М.А., Никитина С.А., Хабибрахманова В.Р. // Патент РФ № 2566067. 2015.
 29. Dinh T., Thompson L. // Reference Module in Food Science, from Encyclopedia of Food and Health. 2016. P. 60.
 30. Гроза Н.В., Голованов А.Б., Наливайко Е.А., Мяжкова Г.И. // Тонкие химические технологии. 2012. Т. 7. № 5. С. 3.
 31. Семенов А.А. Очерк химии природных соединений. Новосибирск: Наука. 2000. 664 с.
 32. Stefaniak-Skorupa J., Milewska M.J. // Chem.Med.Chem. 2025. e202400948.
 33. Jannus F., Sainz J., Reyes-Zurita F.J. // Molecules. 2024. Vol. 29. No 14. P. 3291.
 34. Laszczuk M. // Planta Med. 2009. Vol. 75. P. 1549.
 35. Cheng Le., Ji T., Zhang M., Fang B. // Trends in Food Science & Technology. 2024. Vol. 146. P. 104392.
 36. Наумов В.В. // Кинетика и катализ. 2008. Т. 49. № 2. С. 239.
-
-

EXTRACTION OF BIOACTIVE COMPOUNDS FROM ASPEN BARK (*POPULUS TREMULA L.*) BY SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE

L.Yu. Yarullin — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
ORCID: 0000-0003-1371-6721. E-mail: yarul.lenar@gmail.com (*for correspondence*)

S.A. Kovalenko — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
ORCID: 0000-0002-1728-8819. E-mail: svetlanakov25@gmail.com

Ya.Yu. Korepanova — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
ORCID: 0009-0002-3357-4142. E-mail: yaroslava2900@mail.ru

I.M. Abdulagatov — Institute of Geothermal Problems and Renewable Energy, Branch of JIHT RAS, Makhachkala, Russia; Dagestan State University, Makhachkala, Dagestan, Russia. ORCID: 0000-0002-6299-5280. E-mail: ilmozdina@gmail.com

V.F. Khairutdinov — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
ORCID: 0000-0002-8137-6450. E-mail: kvener@yandex.ru

M.A. Sysoeva — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
ORCID: 0000-0003-1535-8497. E-mail: sysoevama@corp.knrtu.ru

L.Z. Sharafutdinova — Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
ORCID: 0009-0004-6472-3459. E-mail: ls341240@gmail.com

Extracts from the aspen bark (*Populus tremula L.*) were obtained using supercritical (SC) fluid extraction with carbon dioxide at 313.15 and 333.15 K and pressures ranging from 15 to 35 MPa. Chromatography-mass spectrometry was used to determine the component of the CO₂ extract of *Populus tremula L.*, revealing a significant amount of fatty acids and their esters. Traditional liquid extraction with petroleum ether was found

to be significantly less efficient than SC-CO₂ extraction in terms of the content of steroidal and triterpenoid components of the aspen bark in the final product.

Key words: *Populus tremula L.*, aspen bark, supercritical fluid extraction, carbon dioxide, composition.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment no. 075-01508-23-00 of December 29, 2022 [Supercritical fluid technologies in polymer processing (FZSG-2023-0007)].

REFERENCES

1. Zhang J., Yang L., Liu H. // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 3929.
2. Cantarella M., Cantarella L., Gallifuoco A., Spera A., Alfani F. // Biotechnol. Prog. 2004. Vol. 20. P. 200.
3. Abreu I.N., Ahnlund M., Moritz T., Albrechtsen B.R. // J. Chem. Ecol. 2011. Vol. 37. P. 857.
4. Kim J.K., Bae Y-S. // Holzforschung. 2009b. Vol. 63. No 3. P. 315.
5. Si C-L., Xu J., Kim J-K., Bae Y-S., Liu P-T, Liu Z. // Wood Sci Technol. 2011. Vol. 45. P. 5. DOI: 10.1007/s00226-009-0286-x
6. Jeon S.M., Kim H.K., Kim H.J., Do G.M., Jeong T.S., Park Y.B. // Transl. Res. 2007. Vol. 149. No 1. P. 15.
7. Saito T., Abe D., Sekiya K. // Biochem. Biophys. Res. Commun. 2008. Vol. 372. P. 835.
8. Pichette A., Eftekhari A., Georges P., Lavoie S., Mshvildadze V., Legault J. // Can. J. Chem. 2010. Vol. 88. P. 104.
9. Amosova E.N., Zueva E.P., Krylova S.G. // Bull. experimental biology and medicine. 2000. Vol. 129. P. 28.
10. Zueva E.P., Fomina T.I., Razina T.G. // Experimental and clinical pharmacology. 1999. Vol. 62. No 1. P. 28.
11. Rassypanova S.S., Turetskova V.F., Zverev Ya.F. // Plant resources. 2010. Vol. 46. No 3. P. 103.
12. Palo R.T. // J. Chem. Ecol. 1984. Vol. 10. P. 499.
13. Diouf P.N., Stevanovic T., Cloutier A. // Wood Sci Technol. 2009. Vol. 43. P. 457.
14. St-Pierre A., Blondeau D., Lajeunesse A., Bley J., Bourdeau N., Desgagne-Penix I. // Molecules. 2018. Vol. 23. P. 1739.
15. Ahmed A., Grandmaison J. L., Kaliaguine S. // J. Wood Chemistry and Technology. 1986. Vol. 6. P. 219.
16. Fernandez M.P., Watson P.A., Breuil C. // J. Chromatogr. A. 2001. Vol. 922. P. 225.
17. Hubert J., Angelis A., Aligiannis N., Rosalia M., Abedini A., Bakiri A. // Planta Med. 2016. Vol. 82. P. 1351.
18. Pals M., Lauberte L., Ponomarenko J., Lauberts M., Arshanitsa A. // Plants. 2022. Vol. 11. P. 1544.
19. Gil-Chavez G.J., Villa J.A., Ayala-Zavala J.F., Heredia J.B., Sepulveda D., Yahia E.M., Gonzalez-Aguilar G.A. // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2013. 12. No 1. P. 5.
20. Shamsetdinov F.N., Yarullin L.Yu., Gumerov F.M., Gabitov F.R., Zariпов Z.I., Remizov A.B., Kolyadko I.M., Nikitin V.G., Fakhreev A.K., Kamalova D.I. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2011. Vol. 5. P. 1167. DOI: 10.1134/S1990793111070141.
21. Ramazanov A.Sh., Balaeva Sh.A. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2021. Vol. 15. P. 1207. DOI: 10.1134/S1990793121070125.
22. Shakhbanov K.Sh., Abdulagatov I.M., Aliev I.M. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2022. Vol. 16. P. 1213. DOI: 10.1134/S1990793122070144.
23. Pavlova L.V., Platonov I.A., Kurkin V.A., Afanasyeva P.V., Novikova E.A., Mukhanova I.M. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2018. Vol. 12. P. 1212. DOI: 10.1134/S1990793118080109.

**Извлечение биологически активных соединений
из коры осины (*Populus tremula L.*) сверхкритическим диоксидом углерода**

24. Sabirova L.Yu., Yarullin L.Yu., Khabriev I.Sh., Khairutdinov V., Bilalov T.R. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2024. Vol. 18. P. 1761. DOI: 10.1134/S1990793124701306.
 25. Beketova A.B., Kasenova Zh.M. // Bulletin of ENU named after. L.N. Gumilyov. 2012. No 4. P. 249.
 26. Gupta A., Naranawal M., Kothari V. // Intern. J. Applied and Natural Sciences. 2012. Vol. 1. No 1. P. 8.
 27. Chernyshev A.K., Gumerov F.M., Tsvetinsky G.N., Yarullin R.S., Ivanov S.V., Levin B.V., Shaf-ran M.I., Zhilin I.F., Beskov A.G., Chernyshev K.A. // Carbon dioxide: Properties, capture (production), application. Moscow: Galley-print. 2013. 903 p.
 28. Sy'soeva M.A., Nikitina S.A., Xabibraxmanova V.R. // Patent RF No 2566067. 2015.
 29. Dinh T., Thompson L. // Reference Module in Food Science, from Encyclopedia of Food and Health. 2016. P. 60.
 30. Groza N.V., Golovanov A.B., Nalivaiko E.A., Myagkova G.I. // Fine chemical technologies. 2012. Vol. 7. No 5. P. 3.
 31. Semenov A.A. Essay on the chemistry of natural compounds. Novosibirsk: Nauka. 2000. 664 p. (in Russ.).
 32. Stefaniak-Skorupa J., Milewska M.J. // Chem.Med.Chem. 2025. e202400948.
 33. Jannus F., Sainz J., Reyes-Zurita F.J. // Molecules. 2024. Vol. 29. No 14. P. 3291.
 34. Laszczyk M. // Planta Med. 2009. Vol. 75. P. 1549.
 35. Cheng Le., Ji T., Zhang M., Fang B. // Trends in Food Science & Technology. 2024. Vol. 146. P. 104392.
 36. Naumov V.V. // Kinetics and catalysis. 2008. Vol. 49. No 2. P. 239.
-
-