

Содержание биологически активных веществ в водных экстрактах продуктов деструкции кородревесных отходов

© 2024. Т. И. Ширшова, к. х. н., в. н. с., К. Г. Уфимцев, к. б. н., н. с.,
И. В. Бешлей, к. б. н., н. с., А. Г. Донцов, к. х. н., с. н. с.,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: shirshova@ib.komisc.ru

Проведено исследование химического состава продуктов деструкции кородревесных отходов (КДО) из отвала ОАО «Лесопромышленная компания «Сыктывкарский ЛДК». Содержание водорастворимых фракций в образцах из двух скважин составило от 0,1 до 1,1 % массы сухого вещества и зависело от глубины залегания. Эти отличия могут быть связаны с разным временем залегания, неоднородностью отходов, степенью их разложения и увлажнённости. При последовательной обработке сухого водорастворимого остатка растворителями с возрастающей полярностью были получены гексановый, эфирный и хлороформный экстракты, в которых методами тонкослойной (ТСХ) и высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) подтверждено содержание дигидрокверцетина ($t_R=28,6$ мин), ванилиновой ($t_R=11,6$ мин) и *транс-п*-кумаровой ($t_R=17,7$ мин) кислот, которые ранее были обнаружены в этилацетатных и гексановых экстрактах. При анализе образцов КДО на содержание полисахаридов и арабиногалактана в составе продуктов гидролиза водорастворимой гемицеллюлозы методом ВЭЖХ были обнаружены арабиноза, манноза, глюкоза и галактоза, что позволяет охарактеризовать выделенную фракцию, как смесь водорастворимых гемицеллюлоз – арабиногалактана и глюкоманнана. Показано, что независимо от глубины залегания и использования для экстракции воды или органических растворителей разной полярности во всех исследуемых образцах КДО обнаружены одинаковые компоненты – дигидрокверцетин, ванилиновая и *транс-п*-кумаровая кислоты.

Ключевые слова: кородревесные отходы, флавоноиды, кверцетин, дигидрокверцетин, фенолоксилоны, водорастворимые гемицеллюлозы, арабиногалактан, глюкоманнан.

Content of biologically active substances in aqueous extracts of bark-wood waste degradation products

© 2024. T. I. Shirshova ORCID: 0000-0001-8938-612X, K. G. Ufimtsev ORCID: 0000-0002-8708-4213,
I. V. Beshley ORCID: 0000-0002-9195-332X, A. G. Dontsov ORCID: 0000-0003-2559-5226,
Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: shirshova@ib.komisc.ru

The chemical composition of the destruction products of bark-wood waste (BWW) from the dump of JSC “Syktyvkar Timber Processing Company” was studied. The content of water-soluble fractions in samples from two wells ranged from 0.1 to 1.1% of the dry matter mass and depended on the depth of occurrence. These differences may be related to different time of occurrence, heterogeneity of waste, degree of decomposition and moisture content. Sequential treatment of the dry water-soluble residue with solvents of increasing polarity yielded hexane, ether and chloroform extracts. The content of dihydroquercetin ($t_R=28.6$ min), vanillic acid ($t_R=11.6$ min) and *trans-p*-coumaric acid ($t_R=17.7$ min) were confirmed by TLC and HPLC methods. The above substances were previously detected in ethyl acetate and hexane extracts. Arabinose, mannose, glucose and galactose were detected when analyzing BWW samples for polysaccharide and arabinogalactan content in the hydrolysis products of water-soluble hemicellulose by HPLC. This allows us to characterize the isolated fraction as a mixture of water-soluble hemicelluloses – arabinogalactan and glucomannan. The same components – dihydroquercetin, vanillic and *trans-p*-coumaric acids – were found in all studied BWW samples regardless of the depth of occurrence and the use of water or organic solvents of different polarity for extraction. The detection of such strong antioxidants as dihydroquercetin, phenolic acids and arabinogalactan in BWW samples opens prospects for the development of substances based on them for medicine, animal husbandry and other sectors of national economy.

Keywords: bark-wood waste, flavonoids, quercetin, dihydroquercetin, phenolic acids, water-soluble hemicelluloses, arabinogalactan, glucomannan.

Перспективным направлением развития деревообработки в настоящее время является производство наукоёмкой продукции с высокой добавленной стоимостью на базе глубокой комплексной переработки лесных ресурсов. В связи с этим в последние годы наблюдается тенденция смещения акцентов с зелёной экономики на циркулярную экономику, основанную на повторном использовании ресурсов, основополагающими принципами которой является предотвращение образования отходов, повторное их использование и переработка [1–4]. Актуальность решения проблемы утилизации кородревесных отходов (КДО) длительного хранения требует применения высокотехнологичных методов их переработки. Комплексное исследование содержания биологически активных веществ и их компонентного состава, определение зависимости содержания от глубины залегания позволит разработать эффективные методы их выделения и использования в качестве субстанций для различных целей народного хозяйства [5–7].

Российская Федерация занимает второе место в мире по запасам и шестое – по переработке древесины [8]. Россия в настоящее время находится в процессе стимулирования переработки КДО для целей производства биоэнергии и биотоплива и увеличения переработки низкосортных отходов древесины и коры [9].

Проблема утилизации КДО длительного хранения остро стоит и в Республике Коми. В черте г. Сыктывкара почти 100 лет (с 1926 г.) существует короотвал Сыктывкарского лесопильно-деревообрабатывающего комбината (в настоящее время ООО «Сыктывкарский ЛДК»). По информации администрации МО ГО «Сыктывкар» основное количество отходов производства (кора, опилки, щепка, обрезки досок) было накоплено в период 1950–2010 гг. Предполагается, что в 1990–2000-е гг. на свалку вывозили и смёт с улиц города, содержащий песок, камни, бытовой мусор, листья, ветки и другие отходы [7]. Кородревесные отходы современных деревообрабатывающих, целлюлозно-бумажных производств состоят в основном из коры, опилок, кусков древесины разного размера [5, 7]. Химический состав коры существенно отличается от состава древесины соответствующей древесной породы, что обусловлено разным анатомическим строением коры различных видов деревьев. По сравнению с древесиной кора содержит гораздо меньше целлюлозы и значительно

больше экстрактивных и минеральных веществ [10, 11].

При изучении химического состава полифенольного комплекса некоторых видов пихты, ели и сосны было показано, что он является сложной смесью фенольных соединений, включающих флавоноиды, привлекающие интерес из-за широкого спектра биологической активности и их значимости как с экологической точки зрения, так и с перспективой использования их в качестве биологически активных препаратов [12–14]. Из биомассы лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и лиственницы даурской (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.), благодаря использованию комплексной безотходной технологии переработки, в своё время удалось выделить в чистом виде ряд новых природных биологически активных соединений, в том числе таких, как признанный эталоном антиоксидантной активности дигидрокверцетин (ДГК), доказать их структуру и выявить широкий спектр биологической активности [15–17].

Особое место среди природных полисахаридов занимает водорастворимый полисахарид арабиногалактан (АГ), значительное содержание которого в растительном сырье, особенно в коре и ядровой древесине хвойных, а также многообразие ценных качеств предполагает его использование в различных областях науки и народного хозяйства [18, 19]. Он может быть перспективен для синтеза широкого ряда биологически активных веществ. Обладая свойствами пребиотика, АГ может использоваться в качестве диетической добавки в пищевой промышленности и ветеринарии; высокая иммуностимулирующая активность позволяет использовать его в медицине, фармацевтической и косметической промышленности [18]. По результатам наших исследований [6], экстракты КДО содержат в своём составе ДГК. Известно, что в коре лиственницы совместно с ДГК содержится АГ. На их основе создан ряд комплексных препаратов (БАД Ардиксин, Араглин Д и др.), сочетающий уникальные свойства этих двух природных биологически активных веществ [15].

В последние годы, благодаря высокой растворимости в воде, уникально низкой вязкости растворов, низкой токсичности и другим ценным свойствам, исследования биологической активности АГ активизировались. Установлено, что этот полисахарид проявляет иммуномодулирующие, митогенные, антимуtagenные, гастропротекторные

и антимикробные, а также пребиотические свойства. Эти свойства в сочетании с высокой мембранотропностью и диспергирующей способностью открывают широкие перспективы использования АГ в медицине, ветеринарии, пищевой и косметической промышленности. Наличие этих двух компонентов – ДГК и АГ, с высокой антиоксидантной активностью, в составе КДО позволит использовать их для получения субстанций, стимулирующих прорастание семян, рост растений, в качестве компонентов органических удобрений и других полезных препаратов [20, 21].

Целью наших исследований является комплексное изучение содержания водорастворимых фракций биологически активных веществ в продуктах деструкции кородревесных отходов длительного срока хранения, представляющих интерес как сырьё для получения субстанций различного народнохозяйственного значения.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали образцы КДО из короотвала ОАО «Лесопромышленной компании «Сыктывкарский ЛДК». Отбор образцов по градиенту высоты полигона проводили методом бурения двух скважин, представляющих выработки круглого сечения, вертикально пробуренные с поверхности отвала на глубину 20 м (скважина 1) и 27 м (скважина 2). Высота отвала в месте нахождения скважины 2 была на 7 м выше по сравнению со скважиной 1. Однако нижние слои обеих скважин находились на одинаковом уровне относительно поверхности земли. Верхний слой полигона в районе скважины 2 содержал менее разложившиеся отходы. Было отобрано по 9 проб из скважин 1 и 2. Отбор проб по глубине залегания связан с разным возрастом их нахождения в отвале КДО. Образцы, измельчённые до 100–1000 мкм, подвергали предварительной экстракции этилацетатом [2]. Сухую массу КДО заливали водой в соотношении 1:8, нагревали до 95 °С и выдерживали при этой температуре в течение двух часов. Горячую смесь фильтровали через складчатый фильтр, водный экстракт упаривали до ¼ объёма, охлаждали и выливали при перемешивании в этиловый спирт в соотношении экстракт:спирт 1:4. С образовавшегося при стоянии на холоде осадка сливали надосадочную жидкость, осадок промывали спиртом и сушили в вакууме. Массу вещества определяли гравиметрическим

методом. Брали по шесть образцов из обеих скважин, отобранных на разной глубине.

Сухой осадок массой 0,7 г растворяли в воде и экстрагировали несмешивающимися с водой растворителями с возрастающей полярностью: гексан→диэтиловый эфир→хлороформ. Полученные бесцветные растворы фильтровали через безводный сульфат натрия, упаривали в вакууме досуха и определяли массу сухих остатков гравиметрическим методом.

Тонкослойную хроматографию проводили на пластинах DC-Fertigfolien Alugram® Xtra SIL G/UV₂₅₄ размером 20×20 см (Germany) в системе растворителей этилацетат:толуол:муравьиная кислота:вода 30:10:5:1. Проявитель – 10% раствор фосфорномолибденовой кислоты (ФМК) в 95% этиловом спирте. В качестве растворов сравнения использовали стандартные образцы кверцетина, дигидрокверцетина, галловой, феруловой, ванилиновой, протокатеховой, *n*-кумаровой и кофейной кислот.

Высокоэффективную жидкостную хроматографию осуществляли в изократическом режиме на хроматографе Smartline (Knauer, Германия), снабжённом аналитической колонкой Kromasil 100-5C 18, 4×250 мм, петлёй дозирования 20 мкл и детектором Smartline 2600 на диодной матрице. Колонку термостатировали при 25 °С. Детекцию проводили при длине волны 254 нм. В качестве подвижной фазы использовали смесь вода:ацетонитрил:фосфорная кислота с соотношением компонентов 85:15:0,05. Скорость элюирования – 0,7 мл/мин. Образцы перед анализом очищали методом твёрдофазной экстракции на патронах ДИАПАК С16. В качестве стандартов использовали дигидрокверцетин, ванилиновую (Fluka), *транс*-*n*-кумаровую (Alfa Aesar), протокатеховую (Alfa Aesar) кислоты.

Для анализа содержания полисахаридов и присутствия арабиногалактана навески КДО (20–25 г) экстрагировали 300 мл дистиллированной воды при комнатной температуре в течение двух часов. Экстракты фильтровали и вместе с промывными водами упаривали до объёма 100 мл. Тонкую взвесь удаляли фильтрованием через ацетат-целлюлозную мембрану с диаметром пор 1,0 мкм. Остаток песка на дне стакана высушивали и взвешивали для внесения поправки к величине навески КДО. Водорастворимые гемицеллюлозы (ВГМЦ) осаждали добавлением к экстракту 1,5-кратного объёма ацетона. Осадок ВГМЦ отфильтровывали через фильтр Шотта с пористостью 16 (S4), промывали ацетоном,

высушивали на воздухе при небольшом нагревании и взвешивали.

Для проведения кислотного гидролиза к осадку ВГМЦ непосредственно на фильтре Шотта добавляли 3 мл 72% раствора серной кислоты и выдерживали смесь в течение 1 ч при комнатной температуре при периодическом перемешивании, после чего смывали продукты предварительного гидролиза 40 мл воды в коническую колбу. Полученный раствор выдерживали в течение 1 ч в автоклаве при температуре 130 °С и давлении 2,0 атм для предотвращения вскипания реакционной смеси. После охлаждения объём гидролизата ВГМЦ доводили до 50 мл.

Перед анализом продуктов гидролиза методом ВЭЖХ к гидролизату добавляли порошок карбоната бария для удаления серной кислоты до прекращения выделения пузырьков углекислого газа и установления нейтрального значения рН суспензии. Образовавшийся сульфат бария отфильтровывали, фильтрат и промывную воду упаривали досуха. Сухой остаток растворяли в 5 мл 60%-ной смеси ацетонитрила с водой.

Анализ продуктов гидролиза ВГМЦ методом ВЭЖХ проводили на хроматографе Кнауер с рефрактометрическим детектором, используя колонку 250×4 мм Диасорб Амин, 5 мкм (БиоХимМак, Россия), термостат колонки при 30 °С, подвижную фазу ацетонитрил:вода 80:20 об. % при скорости потока 1,0 мл/мин.

Результаты и обсуждение

Проведённые нами ранее исследования [6] содержания биологически активных соединений в образцах КДО, взятых на различной глубине залегания, показали, что при экстракции органическими растворителями разной полярности (гексан, диэтиловый эфир, хлороформ, этилацетат) компонентный состав фенольных фракций остаётся постоянным, включая такие важные антиоксиданты, как дигидрокверцетин и фенолоксилоны (рис.). Анализ методами ТСХ и ВЭЖХ показал, что они содержат шесть соединений фенольной природы, из которых четыре по хроматографическим и спектральным характеристикам идентифицированы как протокатеховая, ванилиновая, *транс-п*-кумаровая кислота и её *цис*-изомер.

Согласно данным авторов [10, 22–24], полученным в результате многолетних исследований, естественное биологическое разложение лигноцеллюлозных отходов в ре-

альных условиях происходит медленно. Даже после более чем 80-летнего хранения полной гумификации древесины в теле отвала коры не происходит, древесная щепа и частицы коры полностью сохранили свою структуру в образцах 75–82 года хранения.

С помощью водной экстракции из КДО были извлечены водорастворимые фракции, содержащие, в том числе, различные полисахариды (табл. 1).

Как видно из таблицы 1, в содержании водорастворимых фракций продуктов КДО в скважинах 1 и 2 наблюдается некоторое различие, что связано с неоднородностью отходов, степенью их разложения, увлажнённости и с различным временем залегания.

При последовательной обработке сухого водорастворимого осадка растворителями с возрастающей полярностью были получены гексановый, эфирный и хлороформный экстракты, содержание сухих веществ в которых приведено в таблице 2.

Анализ ТСХ полученных экстрактов показал, что во всех образцах имеется вещество, отвечающее по коэффициенту подвижности ванилиновой кислоте ($R_f=0,6$), в эфирном и хлороформном экстракте содержится вещество, совпадающее по коэффициенту подвижности с дигидрокверцетином ($R_f=0,53$). Методом ВЭЖХ подтверждено содержание в хлороформном экстракте дигидрокверцетина ($t_R=28,6$ мин), ванилиновой ($t_R=11,6$ мин) и *транс-п*-кумаровой ($t_R=17,7$ мин) кислот.

Для анализа содержания и компонентного состава водорастворимых веществ в КДО была проведена водная экстракция образцов, отобранных на разной глубине залегания в скважинах 1 и 2 (табл. 3). Закономерностей в изменении содержания водорастворимых веществ, распределении их по глубине залегания, так же как и в случае содержания органических соединений фенольной природы, растворимых в органических растворителях разной полярности, не наблюдается. Причины такого неравномерного распределения, как уже указывалось, связаны с неоднородностью залегающих отходов, степенью их разложения и увлажнённости, с различным временем залегания и целым рядом других причин.

При анализе образцов КДО на содержание полисахаридов и арабиногалактана полученная водной экстракцией водорастворимая гемицеллюлоза была подвергнута кислотному гидролизу. В составе продуктов гидролиза методом ВЭЖХ были обнаружены арабиноза,

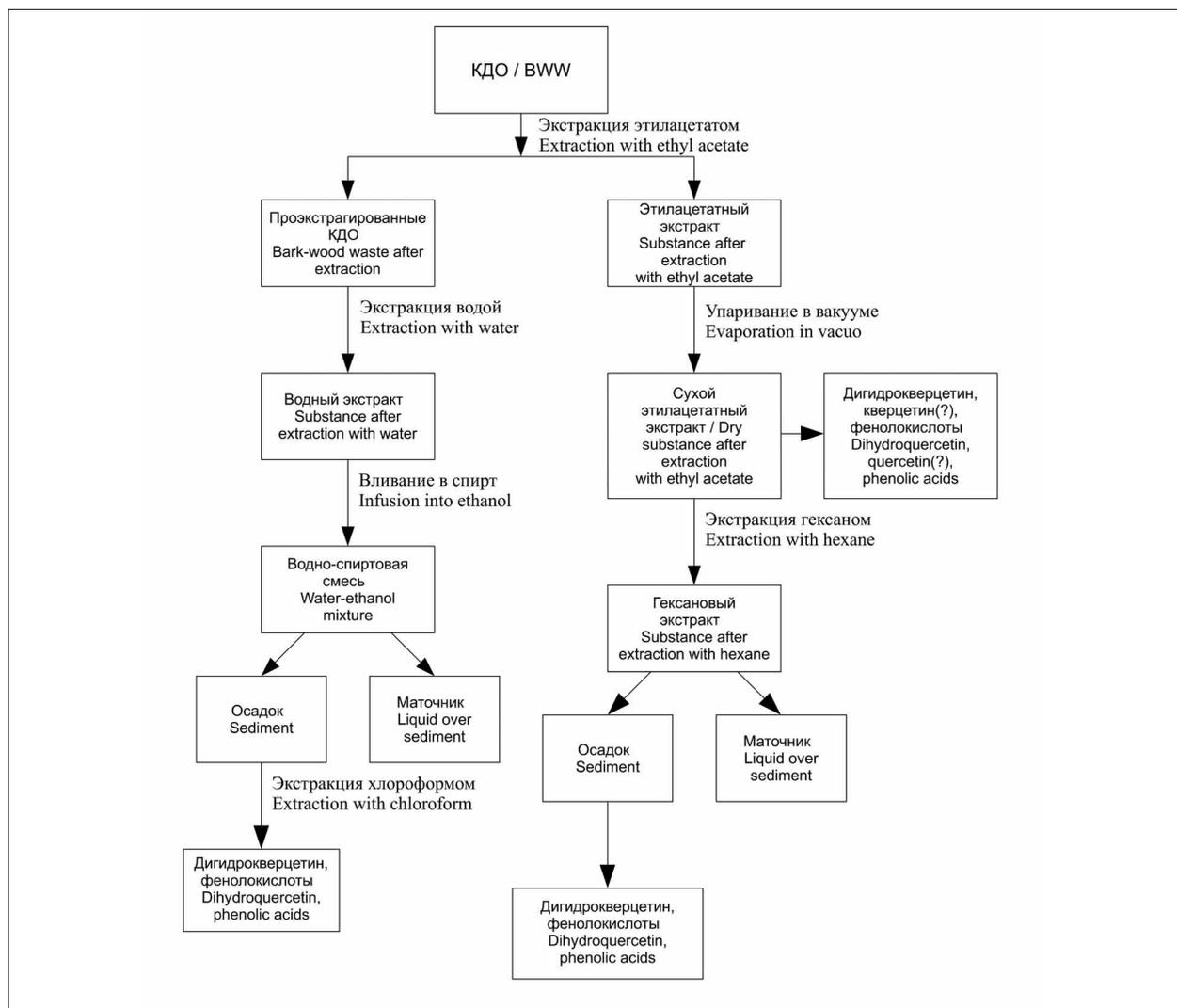


Рис. Схема выделения биологически активных веществ из кородревесных отходов экстракцией растворителями разной полярности.

Примечание: ? – присутствие соединения требует дополнительного подтверждения

Fig. Isolation of biologically active substances from bark-wood waste by extraction with solvents of different polarity (scheme).

Note: ? – the presence of the compound requires additional confirmation

манноза, глюкоза и галактоза, что позволяет охарактеризовать выделенную фракцию ВГМЦ как смесь водорастворимых гемицеллюлоз – арабиногалактана и глюкоманнана.

Заключение

Проведено исследование биологически активных веществ в продуктах деструкции кородревесных отходов, взятых на разной глубине короотвала ОАО «Сыктывкарский ЛДК», расположенного в микрорайоне Лесозавод г. Сыктывкара.

Установлено, что в содержании водорастворимых фракций в продуктах КДО из двух скважин наблюдается некоторое различие, что связано с неоднородностью отходов, сте-

пенью их разложения, увлажнённости и с различным временем залегания. Содержание водорастворимых фракций, полученных из шести образцов, взятых на глубине 1–8 м из скважины 1, составляет 0,2–0,6% массы сухого вещества. В верхних слоях, взятых из скважины 2, содержание водорастворимых фракций значительно ниже (0,1%). Начиная с 15 м, содержание водорастворимых фракций возрастает до 1,1 % от массы сухого вещества.

При последовательной обработке сухого водорастворимого остатка растворителями с возрастающей полярностью были получены гексановый, эфирный и хлороформный экстракты с различным содержанием органических соединений. Анализ ТСХ полученных

Таблица 1 / Table 1

Содержание водорастворимых фракций в образцах кородревесных отходов на различной глубине залегания / The content of water-soluble fractions in bark-wood waste samples at different depths of occurrence

Скважина 1 / Borehole 1		Скважина 2 / Borehole 2	
Глубина залегания образца, м Sample depth, m	Содержание водорастворимой фракции, % сухого вещества The content of the water-soluble fraction, % of dry substance	Глубина залегания образца, м Sample depth, m	Содержание водорастворимой фракции, % сухого вещества The content of the water-soluble fraction, % of dry substance
1–2	0,4	0–1,5	0,1
2–3	0,2	1,5–3	0,1
3–4	0,2	3–4	0,1
4–5	0,3	6–7,5	1,0
5–6	0,6	15–18	1,1
7–8	0,5	21–24	1,1

Таблица 2 / Table 2

Характеристики веществ, полученных при экстракции сухого водорастворимого осадка растворителями разной полярности / Characteristics of substances obtained by extraction of dry water-soluble sediment with solvents of different polarity

Экстрагент Extractant	Масса вещества, % Substance mass, %	Коэффициент подвижности, R_f^* Retardation factor, R_f^*
Гексан / Hexane	1,9	0,77; 0,6 ; 0,48
Диэтиловый эфир / Diethyl ether	5,8	0,8; 0,73; 0,6 ; 0,53
Хлороформ / Chloroform	4,9	0,8; 0,73; 0,6 ; 0,53 ; 0,48

Примечание: * – коэффициент подвижности компонентов экстракта на пластинках ТСХ; жирным шрифтом выделены значения R_f идентифицированных соединений.

Note: * – the retardation factor of the extract components per TLC plates; R_f values of identified compounds are highlighted in bold.

Таблица 3 / Table 3

Содержание водорастворимых гемицеллюлоз в образцах, отобранных на разной глубине отвала на полигоне длительного хранения КДО / The content of water-soluble hemicelluloses in samples taken at different dump depths at the BWW long-term storage landfill

Скважина Borehole	Глубина отбора образцов, м Sample depth, m	Содержание водорастворимых гемицеллюлоз, % The content of water-soluble hemicelluloses, %
1	9–10	0,36
	11–12	0,19
	12–13	0,14
2	3–4	0,69
	4–6	0,60
	7–9	0,19
	18–21	0,19

экстрактов показал, что во всех образцах имеется вещество, отвечающее по коэффициенту подвижности ванилиновой кислоты ($R_f=0,6$), в эфирном и хлороформном экстрактах содержится вещество, совпадающее по коэффициенту подвижности с дигидрохверцетином ($R_f=0,53$). Методом ВЭЖХ подтверждено содержание в хлороформном экстракте в следовых количествах дигидрохверцетина ($t_R=28,6$ мин), ванилиновой ($t_R=11,6$ мин) и *транс-п*-кумаровой ($t_R=17,7$ мин) кислот, которые ранее были обнаружены в этилацетатных и гексановых экстрактах.

При анализе образцов КДО на содержание полисахаридов и арабиногалактана в полученной водной экстракцией водорастворимой гемицеллюлозе после кислотного гидролиза методом ВЭЖХ были обнаружены арабиноза, манноза, глюкоза и галактоза, что позволяет охарактеризовать выделенную фракцию ВГМЦ, как смесь водорастворимых гемицеллюлоз – арабиногалактана и глюкоманнана.

Показано, что независимо от глубины залегания и использования для экстракции воды или органических растворителей разной полярности во всех исследуемых образцах обнаружены

одинаковые компоненты – дигидрокверцетин, ванилиновая и *транс-п*-кумаровая кислоты.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Научно-обоснованные биотехнологии для улучшения экологической обстановки и здоровья человека на Севере». Регистрационный номер в системе ЕГИСУ 1021051101411-4-1.6.23.

References

- Lukina N.V. Global challenges and forest ecosystems // *Her. Russ. Acad. Sci.* 2020. V. 90. No. 6. P. 303–307. doi: 10.1134/S1019331620030119
- Green Economy and the goals of sustainable development for Russia: a collective monograph / Eds. S.N. Bobylev, P.A. Kiryushin, O.V. Kudryavtseva. Moskva: Ekonomicheskiiy fakultet MGU imeni M.V. Lomonosova, 2019. 284 p. (in Russian).
- Srisruthi K.M. Circular economy // *International Journal of Trend in Scientific Research and Development.* 2020. V. 1. No. 6. P. 566–569. doi: 10.31142/ijtsrd46410
- Stahel W.R. The circular economy // *Nature.* 2016. V. 531. No. 7595. P. 435–438. doi: 10.1038/531435a
- Wenig C., Dunlop J.W.C., Hehemeyer-Cürten J., Reppe F.J., Horbelt N., Krauthausen K., Fratzl P., Eder M. Advanced materials design based on waste wood and bark // *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2021. V. 379. No. 2206. Article No. 20200345. doi: 10.1098/rsta.2020.0345
- Ufimtsev K.G., Beshley I.V., Shirshova T.I. The content of extractive substances in the products of destruction of bark-woods wastes generated during long-term storage, taking into account the vertical gradient // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 4. P. 144–150 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-144-150
- Volodin V.V., Shubakov A.A., Volodina S.O., Shergina N.N., Vasilov R.G. Trends in the development of methods of disposal of bark and bark-wood waste of long-term storage (review) // *Agricultural Science Euro-North-East.* 2022. V. 23. No. 5. P. 611–632 (in Russian). doi: 10.30766/2072-9081.2022.23.5.611-632
- Kulikova Yu., Sukhikh S., Babich O., Margina Yu., Krasnovskikh M., Noskova S. Feasibility of old bark and wood waste recycling // *Plants.* 2022. V. 11. No. 12. Article No. 1549. doi: 10.3390/plants11121549
- Kolesnikova A.V. Analysis of the formation and use of wood waste at enterprises of the Russian timber industry // *Aktualnyye Voprosy Ekonomicheskikh Nauk.* 2013. No. 33. P. 116–120 (in Russian).
- Kapitsa E.A., Shorokhova E.V., Romashkin I.V., Galibina N.A., Nikerova K.M., Kazartsev I.A. Decomposition of bark as part of logging slashes after clearcuts in forests of Middle Taiga // *Lesovedenie.* 2019. No. 1. P. 38–48 (in Russian). doi: 10.1134/S0024114819010066
- Deyneko I.P., Deyneko I.V., Belov L.P. Investigation of the pine bark chemical composition // *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* 2007. No. 1. P. 19–24 (in Russian).
- Gromova A.S., Lutskiy V.I., Ganenko T.V., Tyukavkina N.A. Flavonoids from the bark of some species of fir, spruce and pine // *Khimiya Drevesiny.* 1978. No. 4. P. 103–105 (in Russian).
- Fedorova T.E., Babkin V.A. Extractives of *Picea obovata* Ledeb. // *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* 2016. No. 4. P. 165–168 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.2016041401
- Metsämuuronen S., Sirén H. Bioactive phenolic compounds, metabolism and properties: a review on valuable chemical compounds in Scots pine and Norway spruce // *Phytochem. Rev.* 2019. V. 18. P. 623–664. doi: 10.1007/s11101-019-09630-2
- Babkin V.A., Ostroukhova L.A., Ivanova S.Z., Ivanova N.V., Medvedeva E.N., Malkov Yu.A., Trofimova N.N., Fedorova T.E. Products of deep chemical processing of larch biomass. Technology for obtaining and prospects for use // *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal.* 2004. V. XLVIII. No. 3. P. 62–69 (in Russian).
- Babkin V.A., Ostroukhova L.A., Trofimova N.N. Larch biomass: from chemical composition to innovative products. Novosibirsk: Izdatelstvo Sibirskogo otdeleniya RAN, 2011. 235 p. (in Russian).
- Babkin V.A. Extractive substances of larch wood: chemical composition, biological activity and prospects for practical use // *Innovatika i Ekspertiza: Nauchnye Trudy.* 2017. No. 2 (20). P. 210–224 (in Russian).
- Dion C., Chappuis E., Rippol C. Does larch arabinogalactan enhance immune function? A review of mechanistic and clinical trials // *Nutr. Metab. (Lond.)* 2016. V. 13. Article No. 28. doi: 10.1186/s12986-016-0086-x
- Larch Arabinogalactan // *Altern. Med. Rev.* 2000. V. 5. No. 5. P. 463–466.
- Medvedeva E.N., Babkin V.A., Ostroukhova L.A. Arabinogalactan of larch – properties and prospects for use // *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* 2003. No. 1. P. 27–37 (in Russian).
- Levdanskiy V.A., Levdanskiy A.V., Kuznetsov B.N. Isolation of dihydroquercetin and arabinogalactan from larch wood with water-ethanol solutions // *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* 2022. No. 4. P. 107–113 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.20220411959
- Haldar D., Purkait M.K. Lignocellulosic conversion into value-added products: A review // *Process Biochem.* 2020. V. 89. P. 110–133. doi: 10.1016/j.procbio.2019.10.001
- Gu B.J., Dhupal G.S., Wolcott M.P., Ganjyal G.M. Disruption of lignocellulosic biomass along the length of the screws with different screw elements in a twin-screw extruder // *Bioresour. Technol.* 2019. V. 275. P. 266–271. doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.033
- Kamali M., Gameiro T., Costa M.E.V., Capela I. Anaerobic digestion of pulp and paper mill wastes – An overview of the developments and improvement opportunities // *Chem. Eng. J.* 2016. V. 298. P. 162–182. doi: 10.1016/j.cej.2016.03.119