

УДК 544.72

## СОРБЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ МХОВ И ЛИШАЙНИКОВ ЗАУРАЛЬЯ ПО ОТНОШЕНИЮ К ИОНАМ СВИНЦА

© Л.В. Мосталыгина\*, С.Н. Елизарова, А.В. Костин

Курганский государственный университет, ул. Советская, 63/4, 640020  
(Россия), e-mail: mlida59@rambler.ru

Целью работы явилось изучение мхов и лишайников Курганской области для использования их в качестве сорбентов тяжелых металлов. Изучена сорбция ионов свинца (II) на нативных и механохимически активированных образцах мха зеленого (*Pleurozium schreberi*), мха белого (*Sphagnum fuscum*), лишайниках рода Кладония: кладония лесная (*Cladonia sylvatica*) и кладония рогатая (*Cladonia cornuta*), произрастающих в экологически чистых регионах Зауралья.

Концентрацию ионов свинца в модельных растворах измеряли ионометрически (ионоселективный электрод – ХС-Рb-001). Величину удельной поверхности природных сорбентов определяли с использованием классического динамического метода низкотемпературной адсорбции инертных газов (прибор Sorbi®-MS).

Получены изотермы сорбции. Изучена кинетика сорбции. Время установления равновесия колеблется от 30 до 45 мин. Максимальная сорбция ионов свинца (II) на мхе белом ( $a=0.25$  ммоль/г), минимальная – на кладонии лесной ( $a=0.095$  ммоль/г). Выполнена математическая обработка изотерм сорбции, рассчитаны реальные значения эмпирических констант уравнения Фрейндлиха и Лэнгмюра, коэффициенты корреляции. Для описания процессов сорбции более подходит модель Лэнгмюра.

Все используемые сорбенты являются макропористыми. Механохимическая активация мха и лишайника твердым гидрокарбонатом натрия приводит к повышению сорбции ионов свинца (II) в 2–3 раза, что является косвенным подтверждением ионообменного механизма сорбции.

*Ключевые слова:* сорбция, свинец, мох, лишайник, кинетика сорбции, изотерма сорбции.

### Введение

Поликомпонентный состав мхов и лишайников позволяет рассчитывать на их применение для решения широкого спектра задач [1, 2]. В последние годы химики обратили внимание на адсорбционные свойства мхов и лишайников [3–8]. Сравнительного изучения их адсорбционных свойств не проводилось. Для нашего исследования были отобраны виды мхов и лишайников, широко распространенные на территории Курганской области: зеленый мох (*Pleurozium schreberi*), семейство *Hylocomiaceae* и белый мох (*Sphagnum fuscum*), семейство *Sphagnaceae*, а также два вида кустистых лишайников: кладония лесная (*Cladonia sylvatica*) и кладония рогатая (*Cladonia cornuta*) семейства *Cladoniaceae*.

Мхи и лишайники объединяет высокая распространенность на Земном шаре, однако лишайники, по всей видимости, появились на Земле раньше мхов, стоят на более низкой ступени эволюционного развития. Мхи – высшие (то есть имеющие тканевое строение побеговых систем) споровые растения. Лишайники – организмы талломного строения, представляющие собой симбиоз грибов (микобионтов) и водорослей (фотобионтов), по сути, они являются конгломератом фототрофного и гетеротрофного компонентов, каждый из

которых в эксперименте способен существовать отдельно.

Сейчас известно около 250 соединений, входящих в состав лишайников, ежегодно обнаруживают 4 новых. Из них 75 специфические лишайниковые вещества. Все вещества лишайников делятся на две группы: первичные – вещества, которые при-

---

Мосталыгина Лидия Витальевна – кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой физической и прикладной химии, e-mail: mlida59@rambler.ru

Елизарова Светлана Николаевна – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры физической и прикладной химии, e-mail: elizsveta@yandex.ru

Костин Александр Вадимович – старший преподаватель кафедры физической и прикладной химии, e-mail: analyt@kgsu.ru

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

нимают участие в клеточном обмене (из них построены клетки таллома лишайников) и вторичные – конечные продукты обмена веществ (располагаются на стенках гиф), ранее их называли лишайниковые кислоты. Они специфичны для лишайников. Количество вторичных лишайниковых веществ в слоевищах лишайников колеблется в пределах от 0.1–2%, от воздушно-сухой массы – до 2–5%. Так, атранорин присутствует в количестве 1,2–3%, фумарпротоцетрариевая кислота – 0.5–1.5%, гирофоровая кислота – 1–4%, салациновая кислота 4–6%, усниновая кислота – 0.2–4.0% [9].

Оболочки гиф образованы углеводами: хитин ( $C_{30}H_{50}N_4O_{19}$ ), полисахарид лишенин (лишайниковый крахмал) ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>, изолихенин, гемицеллюлозы, дисахариды (сахароза,  $\alpha$ -трегалоза, умбилицин), полиспирты (эритрит, D-маннит, волемит, сифулит). В межклеточных пространствах обнаружены пектиновые вещества. В лишайниках присутствуют ферменты – инвертаза, амилаза, каталаза, уреазы, зимаза, лишениназа. В гифах лишайников обнаружены аминокислоты – аланин, аспарагиновая кислота, глутаминовая кислота, лизин, валин, тирозин, триптофан. В малых количествах есть витамины [10].

Лишайниковые вещества подавляют рост грибов и мхов. Еще много неизвестного в функциях лишайниковых веществ. Но ясно и то, что в разных частях ареала состав лишайниковых веществ может отличаться.

Лишайники обладают способностью извлекать из окружающей среды и накапливать в своем слоевище различные элементы, в том числе и радиоактивные. В лишайниках накапливается намного больше цинка, кадмия, олова и свинца, чем в мхах и цветковых растениях [11].

Химический состав мха Сфагнума недостаточно изучен до сегодняшнего времени. Род сфагнум относится к классу сфагновых мхов (*Sphagnopsida*) и насчитывает не менее 120 видов, широко распространенных на Земном шаре, большей частью в умеренных широтах и в горах субтропиков. Только верхние части побегов растений живые, нижняя часть мертва и превращается в торф. Клеточная структура тканей сфагнума уникальна: листья и побеги растения состоят из двух типов клеток: хлорофильные и гиалиновые. Гиалиновые клетки по сравнению с хлорофильными клетками имеют гораздо более крупные размеры и не содержат протопласта: по сути, это полые целлюлозные оболочки. Гиалиновые клетки имеют поры, благодаря которым они легко (как полости губки) заполняются водой. Если вода удалена, то перетяжки в стенке клетки позволяют сохранить структуру клетки. Сухие растения сфагнума сохраняют клеточную структуру и способность к сорбции. Поры могут поглощать ионы и молекулы из окружающей среды. Диффузия через клеточную стенку, когда клетки частично высушены, направляет как гидрофобные, так и гидрофильные соединения в гиалиновые клетки. Такой ионный обмен должен быть избирательным. Благодаря фотосинтезу при распаде воды в хлорофильных клетках образуются ионы  $H^+$ , и при помощи взаимодействия между гиалиновыми и хлорофильными клетками ионы оказываются в гиалиновых клетках, где они могут быть замещены на другие положительно заряженные ионы из окружающих, такие как  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Zn^{2+}$  и другие. Этот эффект замещения продолжает работать даже после прекращения фотосинтеза в растении [12]. Известно, что в состав мха входит целлюлоза, белки, минеральные соли, вещества фенольной группы (сфагнол), сфагновые кислоты, кумарины. Таким образом, можно предположить два основных механизма сорбции мхом: ионный обмен и комплексообразование с участием функциональных групп органических молекул на поверхности растения.

Существует ряд эффективных методов химического и физического модифицирования сорбентов для увеличения и регулирования их пористой структуры, изменения химической природы поверхности [13–16].

Механохимическая активация может привести к деструкции крупных органических молекул, появлению новых групп молекул способных к комплексообразованию. Возможен распад молекул, окислирование и гидролиз, при этом могут образоваться свободные радикалы. Механохимические процессы также могут привести к разупорядочиванию, аморфизации, полиморфным переходам кристаллических решеток веществ, конформационным превращениям в молекулах. Добавление химических веществ (гидрокарбоната натрия) сопровождается изменением химического состава компонентов мхов и лишайников [10].

Проведенные ранее исследования [17, 18] касались изучения сорбции бентонитовой глины Зырянского месторождения и пищевых волокон, выделенных из масляных культур как нативных, так и активированных образцов, по отношению к ионам тяжелых металлов.

### Экспериментальная часть

Зеленый мох (*Pleurozium schreberi*), семейство *Hylocomiaceae* и белый мох (*Sphagnum fuscum*), семейство *Sphagnaceae*, а также два вида кустистых лишайников: кладония лесная (*Cladonia sylvatica*) и кладония

рогатая (*Cladonia cornuta*), семейства *Cladoniaceae*. были собраны в сосновых лесах на границах Кетовского района Курганской области, максимально удаленных от зон техногенного загрязнения, шоссе и заводов. Сбор материала осуществлялся с июля по август.

Собранные растения сортировали, очищали от примесей и раскладывали на стеллажах тонким слоем. Сушили в течение 2 суток при температуре окружающей среды. Использовали нативный высушенный материал, а также механохимически активированный. Сырье измельчали на электрической лабораторной мельнице марки МЭ-3А, затем для увеличения сорбционной активности биоматериала проводили его химическую активацию. Для активации использовали твердый гидрокарбонат натрия, который добавляли в измельченный сухой образец в количестве 1% (по массе), после чего смесь растирали в фарфоровой ступке. Таким образом, исследованы нативные и механохимически активированные образцы.

Анализируемый раствор, содержащий не более 50 мг Pb в 100 мл, если нужно, предварительно нейтрализовали раствором едкого натра до pH=2–3, затем добавляли 3 мл ацетатного буферного раствора или лучше 10 мл уротропинового буферного раствора; при этом pH раствора должен иметь значение около 5. Прибавляли несколько капель раствора индикатора – ксиленолового оранжевого, и титровали раствором ЭДТА до перехода окраски от красно-фиолетовой к чисто желтой.

Концентрацию соли свинца (моль/л) в анализируемом растворе рассчитывали по формуле

$$C_{Pb(NO_3)_2} = \frac{C_{ЭДТА} \cdot V_{ЭДТА}}{V_a}$$

где  $V_{ЭДТА}$  – объем раствора ЭДТА, пошедшего на титрование, мл;  $C_{ЭДТА}$  – молярная концентрация раствора ЭДТА, моль/л;  $V_a$  – объем аликвотной части раствора соли свинца, взятый для титрования, мл.

Потенциометрическое определение концентрации ионов свинца проводили с использованием свинец-селективного электрода марки ХС-Pb-001 на pH-метре – иономере «Эксперт – 001-3.0», электрод сравнения – хлоридсеребряный. Предварительно по серии стандартных растворов строили градуировочный график. Электрод вымачивали в  $1 \cdot 10^{-3}$  М растворе нитрата свинца перед каждым применением.

Все исследования сорбционных свойств биоматериала проводили в интервале концентраций соли свинца (II) –  $3 \cdot 10^{-2}$ – $1 \cdot 10^{-4}$  моль/л. Навеску мха или лишайника массой 0,5000 г помещали в коническую колбу, приливали раствор нитрата свинца (II) с соответствующей концентрацией и оставляли на 45 мин. Кинетику сорбции изучали методом ограниченного объема [19]. Время контакта сорбента с образцом составляло от 15 до 90 минут (статический режим). Для всех измерений  $n=3$ ;  $p=0.95$ ;  $t_{p,f}=4.30$ .

Сорбцию,  $a$  (ммоль/г), определяли по формуле

$$a = \frac{(C_0 - C_{равн.}) \cdot V_k}{m_{нав.}}$$

где  $C_0$  – начальная концентрация соли свинца в модельном растворе, моль/л;  $C_{равн.}$  – равновесная концентрация соли свинца в растворе после сорбции на природном материале, моль/л;  $V_k$  – объем модельного раствора, мл ( $V_k = 50$ мл);  $m_{нав.}$  – масса навески сорбента, г ( $m_{нав.} = 0.5000$  г).

Погрешность эксперимента не превышала 5%.

Для измерения величины удельной поверхности использован классический динамический метод низкотемпературной адсорбции инертных газов с использованием прибора Sorbi®-MS. Измерения проводились полностью в автоматическом режиме.

### Обсуждение результатов

Время установления равновесия на образцах мха составляло 30 мин, а на лишайниках – 45 мин. Влияние продолжительности контакта (фаз) на величину сорбции ионов свинца на образцах белого мха и кладонии лесной представлено на рисунках 1, 2.

Скорость сорбции ионов свинца максимальна в первые 15 мин контакта с образцами мха и составляет 0.0118 ммоль/г·мин. Скорость сорбции ионов свинца на образцах лишайника остается постоянной в течение 30 мин контакта, составляет 0.002 ммоль/г·мин, то есть в 5.9 раза меньше, чем на образце мха.

Исследована сорбционная способность двух видов мха: зеленый мох (*Pleurozium schreberi*) и белый мох (*Sphagnum fuscum*), а также двух видов кустистых лишайников: кладония лесная (*Cladonia sylvatica*) и кладония рогатая (*Cladonia cornuta*) в отношении ионов свинца, в интервале концентраций нитрата свинца в модельных растворах  $3 \cdot 10^{-2}$ – $1 \cdot 10^{-4}$  моль/л. Получены изотермы сорбции (рис. 3).

Как следует из графика, в области низких концентраций соли свинца в модельном растворе (до 2 ммоль/л) сорбционная способность материалов в отношении ионов свинца примерно одинакова. Однако при более высоких концентрациях ионов свинца в растворе белый и зеленый мох показывают более высокую сорбционную способность, чем лишайники. Максимальная сорбция отмечена для ионов свинца на образцах мха белого (0.25 ммоль/г) минимальная – на кладонии лесной (0.095 ммоль/г).

Видимо, поры гиалиновых клеток, которые сохраняются и в сухих образцах, обеспечивают высокие ионообменные способности образцов мха в отношении ионов свинца. Кроме того, наличие функциональных групп на поверхности сорбента создает дополнительное «связывание» ионов металла. Механохимическая активация образцов мха и лишайника твердым гидрокарбонатом натрия привела к существенному повышению сорбционной активности всех исследуемых образцов (табл. 1).

Таким образом, активация образцов привела к существенному повышению сорбционной активности материала. Для мхов степень сорбции ионов свинца при активации сорбента увеличилась в среднем в 2 раза, а для лишайников – более чем в 3. Как известно, в состав лишайников входят разнообразные органические соединения с карбоксильными группами [20]. Водород карбоксильной группы при активации может замещаться на ионы натрия, которые, в свою очередь, легко замещаются ионами свинца из раствора и других объектов окружающей среды.

Нами выполнена математическая обработка всех изотерм сорбции. Были рассчитаны реальные значения эмпирических констант уравнения Фрейндлиха и Лэнгмюра и коэффициенты корреляции, которые показали, что для описания процессов сорбции подходит модель Лэнгмюра (табл. 2).

Исходя из полученных изотерм адсорбции-десорбции для белого мха, руководствуясь классификацией ИЮПАК, которая составлена на основе классической классификации изотерм адсорбции-десорбции Брунауэра, Деминга, Деминга и Теллера (классификация БДТ), можно заключить, что данный сорбент является макропористым (рис. 4). На это указывает диаграмма распределения пор (рис. 5).

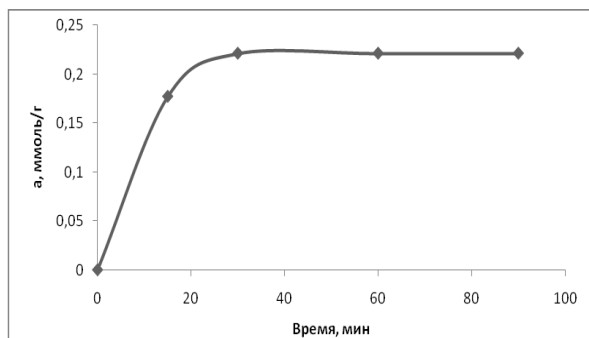


Рис. 1. Влияние продолжительности контакта (фаз) модельного раствора с сорбентом (мох белый) на величину сорбции катионов свинца (II)

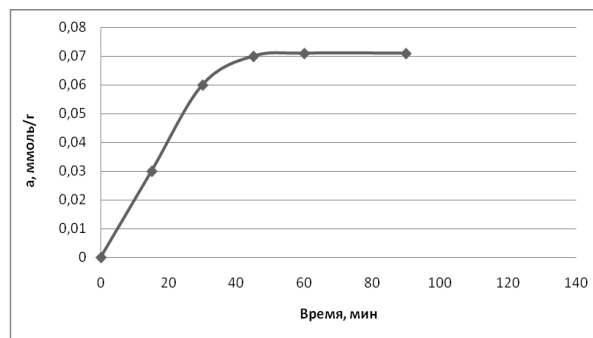


Рис. 2. Влияние продолжительности контакта (фаз) модельного раствора с сорбентом (кладония лесная) на величину сорбции катионов свинца (II)

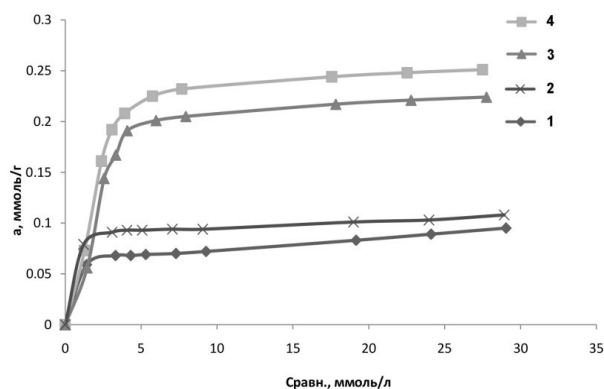


Рис. 3. Изотермы сорбции ионов свинца (II) на природных сорбентах Зауралья (1 – Кладония лесная, 2 – Кладония рогатая, 3 – Мох зеленый, 4 – Мох белый)

Таблица 1. Сравнение сорбционной активности нативных и механохимически активированных образцов мха и лишайника ( $C_0=8$  ммоль/л)

Образец сорбента	Способ обработки материала	Степень сорбции ионов свинца, $\omega$ %
Зеленый мох ( <i>Pleurozium schreberi</i> )	нативный	25
Зеленый мох ( <i>Pleurozium schreberi</i> )	механохимическая активация	55
Белый мох ( <i>Sphagnum fuscum</i> )	нативный	28
Белый мох ( <i>Sphagnum fuscum</i> )	механохимическая активация	65
Кладония лесная ( <i>Cladonia sylvatica</i> )	нативный	9
Кладония лесная ( <i>Cladonia sylvatica</i> )	механохимическая активация	26
Кладония рогатая ( <i>Cladonia cornuta</i> )	нативный	12
Кладония рогатая ( <i>Cladonia cornuta</i> )	механохимическая активация	40

Таблица 2. Коэффициенты корреляции при описании сорбции ионов свинца на образцах мхов и лишайников с использованием моделей Лэнгмюра и Фрейндлиха

Сорбент	Значения коэффициента корреляции, г	
	Модель Фрейндлиха	Модель Лэнгмюра
Зеленый мох ( <i>Pleurozium schreberi</i> )	0.7961	0.9985
Белый мох ( <i>Sphagnum fuscum</i> )	0.7091	0.9986
Кладония лесная ( <i>Cladonia sylvatica</i> )	0.7515	0.9977
Кладония рогатая ( <i>Cladonia cornuta</i> )	0.7980	0.9994

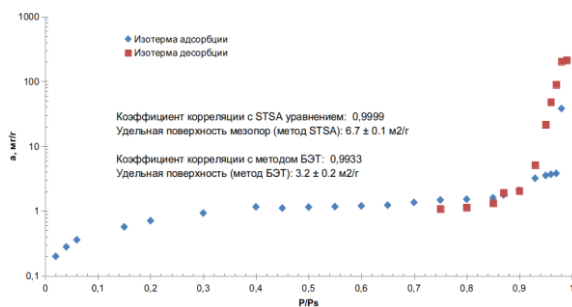


Рис. 4. Изотермы адсорбции-десорбции мха белого

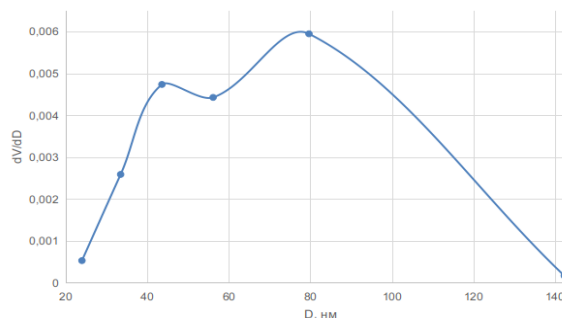


Рис. 5. Диаграмма распределения пор по размерам для образца мха белого

## Выводы

Изучена кинетика сорбции ионов свинца на образцах мхов и лишайников Зауралья. Установлено, что скорость сорбции ионов свинца максимальна в первые 15 мин на образцах мхов и составляет 0.0118 ммоль/г·мин. Скорость сорбции в начальный период времени на образцах лишайников ниже в 5.9 раза.

В области низких концентраций соли свинца в модельном растворе сорбционная активность всех изученных природных материалов примерно одинакова.

Максимальная сорбция отмечена для ионов свинца на образцах мха белого (0.25 ммоль/г), минимальная – на кладонии лесной (0.095 ммоль/г).

Механохимическая активация образцов мха и лишайника твердым гидрокарбонатом натрия привела к повышению сорбционной активности растительных материалов в 2–3 раза, что свидетельствует в пользу ионообменного механизма сорбции. Активация приводит к замещению ионов водорода на ионы натрия в составе карбоксильных групп сорбента, которые легче вступают в реакцию ионного обмена с ионами свинца из водного раствора.

Для описания процессов сорбции, судя по коэффициентам корреляции, лучше подходит модель Лэнгмюра.

## Список литературы

1. Аньшакова В.В. Повышение качества хлебобулочных изделий с помощью механохимического биопрепарата из лишайников // Фундаментальные исследования. 2011. №8. С. 593–596.

2. Межибор А.М., Большунова Т.С. Биогеохимическая характеристика сфагновых мхов и эпифитных лишайников в районах нефтегазодобывающего комплекса Томской области // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325. №1. С. 205–213.
3. Рогова Н.С., Рыжакова Н.К., Борисенко А.Л., Меркулов В.Г. Изучение аккумуляционных свойств мхов, используемых при мониторинге загрязнений атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2011. №1. С. 79–83.
4. Рыжакова Н.К., Бабешина Л.Г., Рогова Н.С. Изучение аккумуляционной способности сфагновых мхов по отношению к долгоживущим изотопам // Химия растительного сырья. 2011. №1. С. 163–167.
5. Рыжакова Н.К., Борисенко А.Л., Меркулов В.Г., Рогова Н.С. Контроль состояния атмосферы с помощью мхов – биоиндикаторов // Оптика атмосферы и океана. 2009. №1. С. 101–104.
6. Чучалин В.С., Келус Н.В. Технология энтеросорбента на основе дерновины сфагнума бурого // Разработка и регистрация лекарственных средств. М., 2015. №12(12). С. 86–91.
7. Мосталыгина Л.В., Костин А.В., Кокшарова Ю.В., Викулин Д.И. Сорбция ионов кадмия талломами кустистых лишайников флоры Зауралья // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №3. С. 148–151.
8. Мосталыгина Л.В., Елизарова С.Н. Ионметрическое изучение сорбции ионов свинца (II) талломами кустистых лишайников Зауралья // Нефтехимия-2018. Материалы I Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. Минск, 2018. С. 94–97.
9. Аньшакова В.В. Низкодозовые антибактериальные биопрепараты на основе лишайников рода *Cladonia* // Фундаментальные исследования. 2012. №4. С. 172–176.
10. Аньшакова В.В., Кершенгольц Б.М., Аньшаков В.И. Интенсификация процессов получения природных веществ антибиотического действия из лишайникового сырья с использованием механохимической технологии // Химия растительного сырья. 2011. №2. С. 133–136.
11. Лозинская Е.Ф., Митракова Т.Н., Жилиева Н.А. Изучение сорбционных свойств природных сорбентов по отношению к ионам меди (II) // Ученые записки: электронный научный журнал Курского государственного университета. 2013. С. 12–18.
12. Патент №2183501 (РФ). Сорбенты, содержащие сфагнум / Э. Бенес. 2002.
13. Jiang M., Wang Q., Jin X., Chen Z. Removal of Pb(II) from aqueous solution using modified and unmodified kaolinite clay // J. Hazard. Matter. 2009. Vol. 170. Pp. 332–339. DOI: 10.1007/s11270-019-4354-z.
14. Лыгина Т.З., Михайлова О.А., Хащринов А.И., Конюхова Т.П. Технологии химической активации неорганических природных минеральных сорбентов: монография. Казань: Казанский университет, 2009. 120 с.
15. Иванов А.А., Юдина Н.В., Ломовский О.И. Влияние механохимической активации на состав и свойства гуминовых кислот торфов // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. №5. С. 73–77.
16. Громько Н.В. Новые растительные сорбенты для очистки водоемов от аварийных разливов нефти и продуктов на ее основе // Молодой ученый. 2015. №10. С. 192–195.
17. Мосталыгина Л.В., Костин А.В., Елизарова С.Н. Изучение сорбции ионов меди на пищевом волокне, выделенном из масличных культур Зауралья и бентонитовой глине // Химия растительного сырья. 2015. №1. С. 167–173. DOI: 10.14258/jcrpm.201501354.
18. Елизарова С.Н., Мосталыгина Л.В., Костин А.В. Сравнительный анализ сорбции ионов свинца пищевыми волокнами и бентонитовыми глинами Курганской области // Вестник Московского государственного педагогического университета. Серия: Естественные науки. 2014. №2(14). С. 47–54.
19. Дудкин М.С., Щелкунов Л.Ф. Об использовании термина «пищевые волокна» и их классификация // Вопросы питания. 1997. №3. С. 42–43.
20. Воробьев Д.В., Мейчик Н.Р. Состав ионообменных групп в клеточных стенках микобионта и фотобионта в составе трехкомпонентного лишайника *Peltigera aphthosa* (L.) Willd // Иммунопатология, аллергология, инфектология. 2009. №1. С. 18–19.

Поступила в редакцию 28 мая 2019 г.

После переработки 23 апреля 2020 г.

Принята к публикации 16 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Мосталыгина Л.В., Елизарова С.Н., Костин А.В. Сорбционная способность мхов и лишайников Зауралья по отношению к ионам свинца // Химия растительного сырья. 2020. №3. С. 315–321. DOI: 10.14258/jcrpm.2020035605.

*Mostalygina L.V.\**, *Elizarova S.N.*, *Kostin A.V.* THE SORPTION CAPACITY OF MOSSES AND LICHENS OF ZAU-  
RALIE IN RELATION TO LEAD IONS

*Kurgan State University, ul. Sovetskaya, 63/4, Kurgan, 640020 (Russia), e-mail: mlida59@rambler.ru*

The purpose of the study is mosses and lichens of the Kurgan region for use as sorbents of heavy metals.

The sorption of lead ions (II) is studied on the native and mechanochemically activated samples of true moss (*Pleurozium schreberi*), white moss (*Sphagnum fuscum*), lichen genus *Cladonia*: *Cladonia forest* (*Cladonia sylvatica*) and *Cladonia horned* (*Cladonia cornuta*), growing in the ecologically clean districts of Zauralie.

The concentration of lead ions in model solutions has been measured ionometrically (ion-selective electrode – XC-Pb-001). The specific surface area of natural sorbents has been determined using the classical dynamic method of low-temperature adsorption of inert gases (Sorbi®-MS device).

Sorption isotherms have been obtained. The sorption kinetics has been studied. Equilibration time varies from 30 to 45 min. It is shown that the maximum sorption of lead ions (is) on white moss ( $a=0.25$  mmol/g). The mathematical treatment of sorption isotherms has been fulfilled, actual values of empirical constants of Freundlich's and Langmuir's equations and correlation coefficients have been calculated. Langmuir's model is most suitable to describe the sorption processes.

All the used sorbents are macroporous. The mechanochemical activation of moss and lichen with solid sodium hydrogen carbonate leads to an increase in the sorption of lead ions (II) by 2–3 times, which is an indirect confirmation of the ion-exchange mechanism of sorption.

*Keywords:* sorption, lead, moss, lichen, sorption kinetics, sorption isotherm.

### References

1. An'shakova V.V. *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2011, no. 8(3), pp. 593–596. (in Russ.).
2. Mezhibor A.M., Bol'shunova T.S. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 205–213. (in Russ.).
3. Rogova N.S., Ryzhakova N.K., Borisenko A.L., Merkulov V.G. *Optika atmosfery i okeana*, 2011, no. 1, pp. 79–83. (in Russ.).
4. Ryzhakova N.K., Babeshina L.G., Rogova N.S. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2011, no. 1, pp. 163–167. (in Russ.).
5. Ryzhakova N.K., Borisenko A.L., Merkulov V.G., Rogova N.S. *Optika atmosfery i okeana*, 2009, no. 1, pp. 101–104. (in Russ.).
6. Chuchalin V.S., Kelus N.V. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv*. [Development and registration of medicines]. Moscow, 2015, no. 12(12), pp. 86–91. (in Russ.).
7. Mostalygina L.V., Kostin A.V., Koksharova Yu.V., Vikulin D.I. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2016, no. 3, pp. 148–151. (in Russ.).
8. Mostalygina L.V., Yelizarova S.N. *Neftekhimiya-2018. Materialy I Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i neftegazo-pererabotke*. [Petrochemistry-2018. Materials of the 1st International Scientific and Technical Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Processing]. Minsk, 2018, pp. 94–97. (in Russ.).
9. An'shakova V.V. *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2012, no. 4, pp. 172–176. (in Russ.).
10. An'shakova V.V., Kershengol'ts B.M., An'shakov V.I. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2011, no. 2, pp. 133–136. (in Russ.).
11. Lozinskaya Ye.F., Mitrakova T.N., Zhilyayeva N.A. *Uchenyye zapiski: elektronnyy nauchnyy zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, pp. 12–18. (in Russ.).
12. Patent 2183501 (RU). 2002. (in Russ.).
13. Jiang M., Wang Q., Jin X., Chen Z. *Hazard. Matter*, 2009, vol. 170, pp. 332–339. DOI: 10.1007/s11270-019-4354-z.
14. Lygina T.Z., Mikhaylova O.A., Khatsrinov A.I., Konyukhova T.P. *Tekhnologii khimicheskoy aktivatsii neorganicheskikh prirodnykh mineral'nykh sorbentov: monografiya*. [Technologies for chemical activation of inorganic natural mineral sorbents: monograph]. Kazan, 2009, 120 p. (in Russ.).
15. Ivanov A.A., Yudina N.V., Lomovskiy O.I. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 309, no. 5, pp. 73–77. (in Russ.).
16. Gromyko N.V. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 10, pp. 192–195. (in Russ.).
17. Mostalygina L.V., Kostin A.V., Elizarova S.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2015, no. 1, pp. 167–173. DOI: 10.14258/jcprm.201501354. (in Russ.).
18. Elizarova S.N., Mostalygina L.V., Kostin A.V. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye nauki*, 2014, no. 2(14), pp. 47–54. (in Russ.).
19. Dudkin M.S., Shchelkunov L.F. *Voprosy pitaniya*, 1997, no. 3, pp. 42–43. (in Russ.).
20. Vorob'yev D.V., Meychik N.R. *Immunopatologiya, allergologiya, infektologiya*, 2009, no. 1, pp. 18–19. (in Russ.).

Received May 28, 2019

Revised April 23, 2020

Accepted June 16, 2020

**For citing:** Mostalygina L.V., Elizarova S.N., Kostin A.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 3, pp. 315–321. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020035605.

\* Corresponding author.

