

УДК 504.062
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4299
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Сорбция тяжелых металлов лигнинсодержащими осадками целлюлозно-бумажной промышленности

А.С. Шатрова[✉], А.В. Богданов, О.В. Тюкалова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, г. Иркутск

[✉]shatrova.irk@gmail.com

Аннотация. Актуальность. В настоящее время особенно остро стоит проблема загрязнения почв тяжелыми металлами, которые аккумулируются в организме животных и растений, вызывая различные токсические эффекты. Несмотря на существование различных методов рекультивации нарушенных земель, как правило, их применение неэффективно или дорогостояще, особенно когда речь идет об аномально высоких концентрациях тяжелых металлов. Таким образом, крайне актуальной задачей является поиск эффективных и недорогих способов рекультивации земель, загрязненных высокими концентрациями тяжелых металлов. Статья посвящена изучению возможности использования смеси, полученной из накопленных отходов лигнинсодержащих осадков целлюлозно-бумажной промышленности ОАО «Байкальский ЦБК» в качестве сорбента. **Цель:** изучение и оценка эффективности использования в качестве сорбента тяжелых металлов смеси, в состав которой входят вымороженные лигнинсодержащие осадки ОАО «Байкальский ЦБК». **Методы.** Для оценки сорбционной эффективности полученного сорбента из вымороженных осадков шлам-лигнина были взяты образцы аномально загрязненных почв промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», расположенного в МО «г. Свирск» Иркутской области. Для определения поверхностной структуры полученного сорбента на наличие микро-, мезо- и макропор проводилась съемка его поверхности на двухлучевой системе JEOL. Для установления типов связей сорбента с извлекаемыми металлами использовался метод ИК-спектроскопии. **Результаты.** Исследования показали, что полученный сорбент из вымороженных лигнинсодержащих осадков ОАО «Байкальский ЦБК» имеет пористую структуру с преобладанием мезопор, сорбирующих ионы тяжелых металлов, при этом большое количество микропор способствует возникновению процессов химической сорбции. Полученные ИК-спектры указывают на возможность химической сорбции свинца в результате реакции замещения атома водорода в различных гидроксильных группировках сорбента группы ароматических или карбоксильных структур. При этом полученный сорбент по своим сорбционным свойствам не уступает товарным природным сорбентам – бентонитовой глине и низовому торфу. Проведенные исследования позволяют сделать положительное заключение о возможности применения разработанной смеси в качестве сорбента для иммобилизации тяжелых металлов при рекультивации земель, которые загрязнены высокими содержаниями тяжелых металлов, в том числе свинцом.

Ключевые слова: сорбция, переработка отходов, ОАО «Байкальский ЦБК», шлам-лигнин, тяжелые металлы

Для цитирования: Шатрова А.С., Богданов А.В., Тюкалова О.В. Сорбция тяжелых металлов лигнинсодержащими осадками целлюлозно-бумажной промышленности // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 66–74. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4299

UDC 504.062
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4299

Heavy metal sorption with lignin-containing sludge from the pulp and paper industry

A.S. Shatrova[✉], A.V. Bogdanov, O.V. Tyukalova

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

[✉]shatrova.irk@gmail.com

Abstract. Relevance. At present, the problem of soil pollution with heavy metals, which are accumulated in the body of animals and plants, causing various toxic effects, is especially acute. Despite the existence of various methods of reclamation of disturbed lands, as a rule, their application is inefficient or expensive, especially when it comes to abnormally high concentrations of heavy metals. Thus, an extremely urgent task is to find effective and inexpensive ways to recultivate lands contaminated with high concentrations of heavy metals. The article considers one of the promising areas for the reclamation of such lands using a mixture obtained from the accumulated waste of lignin-containing sediments from the pulp and paper industry of Baikal Pulp and Paper Mill as sorbents. **Aim.** To study and evaluate the effectiveness of using a mixture, which includes frozen lignin-containing sediments of Baikal Pulp and Paper Mill, as heavy metal sorbent. **Methods.** To assess the sorption efficiency of the obtained sorbent from the frozen sediments of sludge-lignin, the samples of anomalously contaminated soils were taken from the industrial site of the former battery plant "Vostsibelement", located in Svirsk, Irkutsk region. To determine the surface structure of the obtained sorbent for the presence of micro-, meso-, and macropores, its surface was surveyed using a JEOL two-beam system. IR spectroscopy was used to establish the types of bonds between the sorbent and the extracted metals. **Results.** The studies have shown that the resulting sorbent from the frozen lignin-containing sediments of Baikal Pulp and Paper Mill has a porous structure with a predominance of mesopores, sorbing heavy metal ions, while a large number of micropores contributes to the occurrence of chemical sorption. The obtained IR spectra indicate the possibility of chemical sorption of lead as a result of the reaction of substitution of a hydrogen atom in various hydroxyl groups of the sorbent of the group of aromatic or carboxyl structures. At the same time, the resulting sorbent in terms of its sorption properties is not inferior to commercial natural sorbents – bentonite clay and grassroots peat. The conducted studies allow us to make a positive conclusion about the possibility of using the developed mixture as a sorbent for the immobilization of heavy metals during the reclamation of lands that are contaminated with high levels of heavy metals, including lead.

Keywords: sorption, waste processing, Baikal Pulp and Paper Mill, lignin sludge, heavy metals

For citation: Shatrova A.S., Bogdanov A.V., Tyukalova O.V. Heavy metal sorption with lignin-containing sludge from the pulp and paper industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 66–74. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4299

Введение

Проблема загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами заключается в их способности поступать и накапливаться в различных органах растений и животных, приводя тем самым к серьёзным последствиям. Даже в небольших концентрациях такие тяжелые металлы, как мышьяк, ртуть, свинец, кадмий, а также их соединения, крайне токсичны для большинства высших животных и растений [1]. Например, некоторые из фитотоксических проявлений тяжелых металлов включают нарушение захвата и транслокации питательных веществ, снижение фотосинтеза (уменьшение количества фотосинтетических пигментов), ингибирование транспорта электронов, снижение концентрации CO_2 , фотоокислительное повреждение, образование активных форм кислорода (АФК), ингибирование антиоксидантных ферментов, дисбаланс клеточного окислительно-восстановительного потенциала, повреждение ДНК и окисление белков [2]. При этом накопление тяжелых металлов в почве вызывает озабоченность в сельскохозяйственном производстве из-за неблагоприятного воздействия, влияющего на безопасность пищевых продуктов и приводящего к снижению объема и роста урожая из-за фитотоксичности [3, 4].

Особенно остро стоит проблема загрязнения почвы тяжелыми металлами, поскольку существует опасность не только их поступления в организм человека по трофической цепочке, но и вторичного загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха и подземных вод.

Согласно [5], по результатам многолетних наблюдений за период с 2012 по 2021 гг., в Российской Федерации по индикатору неблагоприятного воздействия на здоровье населения, который выражается в показателе загрязнения почв Z_{ϕ} , к опасной категории загрязнения почв тяжелыми металлами (Z_{ϕ} более 32) относятся почвы следующих территорий: в Иркутской области – территория МО «г. Свирск» ($Z_{\phi}=54$), в Красноярском крае значительно загрязнены почвы г. Норильска ($Z_{\phi}=123$), в Свердловской области тяжелыми металлами загрязнены почвы однокилометровой зоны от ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод» в г. Ревда ($Z_{\phi}=52$), почвы городов Кировград ($Z_{\phi}=46$) и Реж ($Z_{\phi}=49$), в Новосибирской области наиболее загрязненными являются почвы Кировского района г. Новосибирска ($Z_{\phi}=65$).

На территории Иркутской области промышленные центры Прибайкалья сформировали зоны опасной категории в таких крупных промышленных городах, как Братск (алюминиевый завод, завод ферросплавов), МО «г. Свирск» (бывший металлургический и аккумуляторный заводы), Иркутск (строительные, машиностроительные заводы), Черемхово (заводы тяжелого машиностроения, механический, химический, а также добыча угля открытым способом).

Несмотря на существование большого количества методов восстановления земель, таких как известкование, внесение органических веществ, фиторемедиация [6], устранение миграции тяжелых металлов или их извлечение различными химиче-

скими [7], физико-химическими способами и другими методами, зачастую их применение неэффективно или дорогостояще, особенно когда речь идет об аномально высоких концентрациях тяжелых металлов [8, 9]. В этом случае применяются кардинальные меры, включающие в себя полное снятие, вывоз и утилизацию загрязненного почвогрунта с его заменой на новый рекультивационный слой, что является крайне дорогостоящими и громоздкими мероприятиями.

В связи с этим встает вопрос о поиске эффективных и недорогих способов рекультивации земель, загрязненных высокими концентрациями тяжелых металлов. В статье рассматривается возможность применения разработанных смесей, полученных из накопленных отходов лигнинсодержащих осадков целлюлозно-бумажной промышленности в качестве эффективных сорбентов для иммобилизации тяжелых металлов при проведении рекультивации нарушенных земель.

Материалы и методы

Известно [10, 11], что некоторые тяжелые металлы способны образовывать сложные малорастворимые комплексные соединения с органическим веществом почв, тем самым снижая их биодоступность, а применение органических удобрений увеличивает запасы гумуса в почве, улучшает ее буферную способность и поглощающую емкость, являясь эффективным средством снижения подвижности тяжелых металлов [12].

Целью исследования являлось изучение и оценка эффективности использования в качестве сорбента тяжелых металлов органоминерального субстрата, в состав которого входит вымороженный лигнинсодержащий осадок ОАО «Байкальский ЦБК» (рис. 1). При этом все концентрации валовых

форм тяжелых металлов в исследуемых образцах лигнинсодержащих осадков карт-накопителей соответствуют гигиеническим нормативам. По отношению к фоновым значениям средних содержаний тяжелых металлов в Прибайкалье (Байкальский геоэкологический полигон) в вымороженных лигнинсодержащих осадках наблюдается превышение меди, цинка и ртути в 1,7, 1,8 и 5,2 раз соответственно [13]. Однако вымороженные лигнинсодержащие осадки по своему составу соответствуют ГОСТ Р 54534-2011 «Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель».

В состав предполагаемого сорбента входят вымороженные лигнинсодержащие осадки целлюлозно-бумажной промышленности, а в качестве добавок внесены золы ТЭЦ и осадки канализационных очистных сооружений г. Байкальска в соотношении 7:1:1. При этом ранее проведенные исследования состава зол ТЭЦ и осадков канализационных очистных сооружений г. Байкальска показали, что концентрации тяжелых металлов в образцах соответствуют гигиеническим нормативам, кроме содержания меди в золе ТЭЦ – превышение по ОДК для суглинистых и глинистых почв с pH_{KCl} более 5,5 в 2,3 раза [13]. За счет невысокого компонентного содержания зол ТЭЦ в получаемом сорбенте (11 %) установленная удельная эффективная активность природных радионуклидов в образцах сорбента не превышает 300 Бк/кг, что соответствует ГОСТ Р 54651-2011 «Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия». Возможность использования данной смеси в качестве сорбента, прежде всего, обусловлена содержанием более 40 % микроцеллюлозного волокна.



Рис. 1. Солзанский полигон ОАО «Байкальский ЦБК» для складирования лигнинсодержащих осадков (более 6 млн м³)
Fig. 1. Solzansky landfill of Baikalsky Pulp and Paper Mill for storage of lignin-containing sediments (more than 6 million cubic meters)

Таблица 1. Результаты процесса сорбция–десорбция тяжелых металлов с применением полученного сорбента
Table 1. Results of sorption–desorption of heavy metals using the obtained soil-sorbent

Показатели Indicators	Pb		Cu		Ni		Zn	
	мг/л/mg/l							
	5	400	5	400	5	400	5	400
СОЕ, мг/г/Static exchange capacity, mg/g	0,2	8,7	0,15	4,7	0,14	3,6	0,12	2,8
Е, %	94	44	60	23	56	18	48	14
Десорбция 24 ч/Desorption 24 h, %	3	16	5	15	8	10	5	14

Ранее проведенные исследования [14] показали, что эффективность сорбции тяжелых металлов сорбентом располагается в ряду $Pb > Cu > Ni > Zn$, а сорбированные ионы металлов имеют достаточно прочную физико-химическую связь с поверхностью сорбента. Установлено, что использование разработанного сорбента способно иммобилизовать тяжелые металлы в почве со снижением концентраций их подвижных форм до 80 %.

В табл. 1 приведены результаты эксперимента по изучению процесса сорбция–десорбция тяжелых металлов на изучаемом сорбенте в модельных растворах с концентрациями ионов металлов свинца, меди, никеля и цинка 5 и 400 мг/л.

Как видно из табл. 1, максимальная степень извлечения E (%) зафиксирована у свинца с концентрацией 5 мг/л и составляет 94 %, при этом с увеличением концентрации свинца до 400 мг/л происходит снижение степени извлечения до 44 % со степенью десорбции, равной 16 %, что говорит о высокой поглотительной способности предлагаемого сорбента по отношению к свинцу [15]. Так как максимальное значение десорбции не превышает 16 %, можно сделать вывод о том, что

остальная часть сорбированных ионов металлов (84 %) имеет достаточно прочную физико-химическую связь с поверхностью сорбента, эффективность которого соизмерима с такими природными сорбентами, как бентонитовая глина и низовой торф [14].

Для оценки сорбционной эффективности полученного сорбента были взяты образцы аномально загрязненных почв промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», расположенной в МО «г. Свирск» (рис. 2) Иркутской области [16].

Превышения свинца в МО «г. Свирск» достигает 3-300 ПДК [17].

Для определения поверхностной структуры полученного сорбента на наличие микро-, мезо- и макропор проводилась съемка его поверхности на двухлучевой системе JEOL серии JIB-4501 (JEOL, Япония), представляющей собой многофункциональный растровый электронный микроскоп, оснащенный мощной ионной пушкой. Изучаемые образцы полученного сорбента высушивались до воздушно-сухого состояния, растирались в агатовой ступке и анализировались на микроскопе.



Рис. 2. Промплощадка бывшего завода «Востсибэлемент» МО «г. Свирск»
Fig. 2. Industrial site of the former Vostsibelement plant, the city of Svirsk

Для установления типов связей сорбента с извлекаемыми металлами использовался метод ИК-спектроскопии на приборе IR Prestige-21 (Shimadzu, Япония), который является первым ИК-Фурье спектрометром, позволяющим работать не только в классической средней ИК-области (MIR), но и в ближней (NIR) и дальней (FIR) областях. Образцы для ИК-спектроскопии готовились следующим образом: растертый в агатовой ступке полученный сорбент (0,5 г) обрабатывался насыщенным раствором нитрата свинца с концентрацией 30 г/100 мл и выдерживался 24 часа, затем отфильтровывался, промывался водой, высушивался при 105 °С и анализировался на ИК-спектрометре. ИК-спектры образцов регистрировались с помощью приставки НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения) с кристаллом из селенида цинка.

Все исследования проводились на высокоточном современном оборудовании по аттестованным методикам в лабораториях Технопарка ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Полученные результаты и их обсуждение

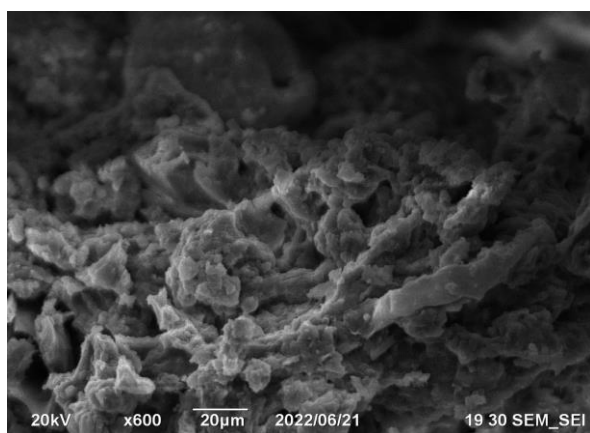
Применение электронной микроскопии позволяет оценить структуру и наличие микро-, мезо- и макропор в исследуемых образцах сорбента. На рис. 3 представлены результаты микроскопической съемки поверхности сорбента (в 600 и 4000 раз), полученного из вымороженных осадков шлам-лигнина ОАО «Байкальский ЦБК».

Как видно из рис. 3, поверхность полученного сорбента обладает высокой степенью пористости с наличием макро-, мезо- и микропор в его структуре, что обуславливает его применение в качестве сорбента. Макропоры выполняют функцию транспортных каналов, облегчающих диффузию адсор-

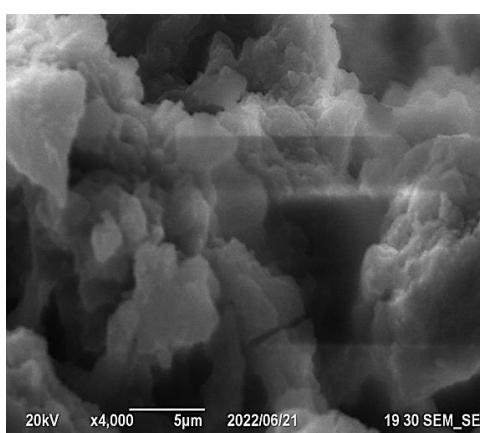
бирующихся молекул к внутренним слоям сорбента, мезопоры отвечают за образование последовательных адсорбционных слоев с заполнением пор по механизму капиллярной конденсации, а наличие микропор позволяет значительно увеличить удельную поверхность, повысить химическую активность и адсорбционную ёмкость сорбента [18]. Установлено, что соотношение микро-, мезо- и макропор в исследуемых образцах составляет 20:50:30 соответственно. При этом структура исследуемого сорбента является в большей степени корпускулярной за счёт срастания большого числа отдельных элементов – первичных частиц. Порами в данном случае являются промежутки между частицами, которые срослись вследствие процессов вымораживания–оттаивания коллоидных осадков шлам-лигнина [19].

На рис. 4 приведены ИК-спектры поверхности полученного сорбента до (1) и после (2) сорбирования ионов свинца.

При исследовании возможности сорбции ионов свинца полученным сорбентом обнаружено, что в ИК-спектрах наблюдаются следующие изменения. В ИК-спектре обработанного раствором свинца сорбента снижается интенсивность полосы 1230 см^{-1} , характеризующей фенольные фрагменты и свободные карбоксильные группы [20], при этом возрастает интенсивность полосы 1410 см^{-1} , относящейся к симметричным колебаниям карбоксилатов, характерных для комплексов гумусовых кислот с ионами тяжелых металлов [21]. Аналогичные результаты были получены в [22], где было показано, что катионы свинца взаимодействуют с гуминовыми веществами, в том числе с гуминовыми кислотами по ионно-обменному механизму при участии карбоксильных и фенольных групп (рис. 5).



a/a



б/б

Рис. 3. Микроскопический снимок поверхности сорбента, полученного из вымороженных осадков шлам-лигнина ОАО «Байкальский ЦБК», увеличение в 600 раз (а), увеличение в 4000 раз (б)

Fig. 3. Microscopic image of the surface of the sorbent obtained from the frozen sediments of the sludge-lignin of the Baikal Pulp and Paper Mill, 600x increase (a), 4000x increase (b)

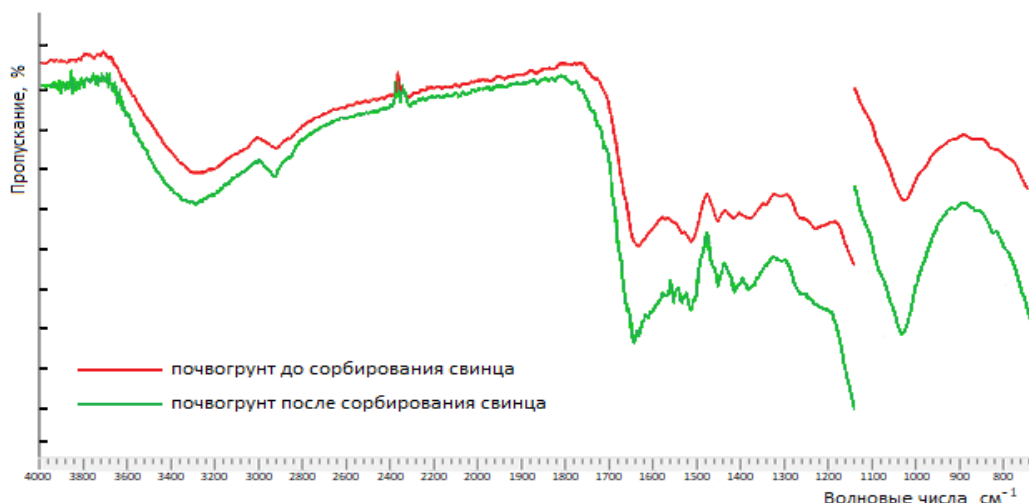


Рис. 4. ИК-спектры поверхности полученного сорбента до (1) и после (2) сорбирования ионов свинца
Fig. 4. IR spectra of the surface of the sorbent obtained before (1) and after (2) sorption of lead ions

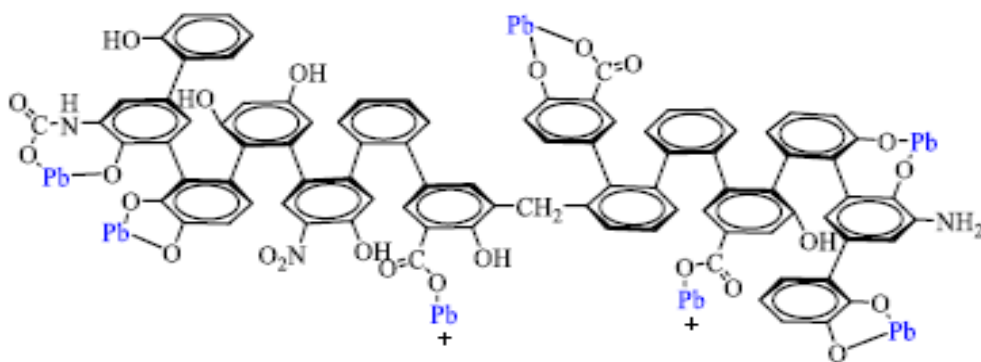


Рис. 5. Связывание ионов Pb^{2+} с гуминовыми веществами [22]
Fig. 5. Binding of Pb^{2+} ions with humic substances [22]

Полосы в области 1230–1270 cm^{-1} могут быть отнесены к колебаниям С-О групп в группировках простых и сложных эфиров, а также в фенолах [23]. Изменение спектра в этой области также свидетельствует об изменении состояния фенола вследствие координации иона металла.

Значительные изменения наблюдаются в области 1500–1600 cm^{-1} , относящейся к С-С валентным колебаниям ароматического кольца, и валентным колебаниям группы С=О. Изменения в этой области могут свидетельствовать об изменении в характере замещения в ароматическом кольце.

Также значительно изменяется форма полосы поглощения при 1630–1640 cm^{-1} , которая обусловлена наложением колебаний ароматической С=С связи, колебаний С-Н в гетероциклических группах и колебаниями карбоксильных групп [21]. Кроме того, наблюдается некоторое изменение симметрии полосы валентных колебаний О-Н группы.

Таким образом, совокупность изменений в спектре ИК поглощения полученного сорбента после обработки его солью свинца показывает возмож-

ность его химической сорбции в результате замещения атома водорода в различных гидроксильных группировках. Возникающие сдвиги полос поглощения связаны с изменением зарядов и распределением масс внутри органических структур. В процессах хемосорбции участвуют преимущественно гидроксильные группы ароматических или карбоксильных структур. Отсутствие изменений ИК полосы 1040 cm^{-1} , относящейся к колебаниям С-О в группе $\text{CH}_3\text{-OH}$, обусловлено нахождением С-О в первичной спиртовой группе в различных конформациях, что свидетельствует о том, что эти гидроксильные группы не участвуют в процессе хемосорбции ионов свинца.

Выводы по результатам ИК-спектроскопических исследований согласуются с полученными ранее результатами сорбция–десорбция, представленными в табл. 1, по которым можно предположить, что механизм сорбции тяжелых металлов полученным сорбентом может складываться до 16 % за счет химической адсорбции и до 84 % за счет физической адсорбцией [14].

Таблица 2. Сравнение качественных показателей рекультивации исследуемыми сорбентами

Table 2. Comparison of qualitative indicators of reclamation with the studied sorbents

Показатели Indicators	Объект исследования/Object of research			
	Усредненная проба почвы с промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» Averaged soil sample from the industrial site of the former Vostsibelement plant	Почва с внесенным сорбентом (10:1) Soil with applied sorbent (10:1)	Почва с внесенным сорбентом – низинным торфом (10:1) Soil with added sorbent – lowland peat (10:1)	Почва с внесенным сорбентом – Бентонитовой глиной (10:1) Soil with added sorbent – bentonite clay (10:1)
Свинец подвижный, мг/кг (ПДК=6,0) Lead mobile, mg/kg (MPC=6,0)	603	6,3	6,8	5,8
Медь подвижная, мг/кг (ПДК=3,0) Cuprum mobile, mg/kg (MPC=3,0)	98,8	4,4	5,6	3,2
Цинк подвижный, мг/кг (ПДК=23,0) Zinc mobile, mg/kg (MPC=23,0)	219	25,3	24,6	22,5
Класс опасности Hazard Class	II	IV	IV	IV

В табл. 2 приведены результаты исследований по качественным показателям рекультивации земель промплощадки «Востсибэлемент» с использованием товарных сорбентов природного происхождения и предлагаемого сорбента из отходов целлюлозно-бумажной промышленности. В качестве исходной пробы исследовалась усредненная почва с промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент», в которую вносился полученный сорбент в различных соотношениях. После окончания процессов стабилизации смеси проводился ее анализ.

Как видно из табл. 2, сорбент, в состав которого входит вымороженный лигнинсодержащий осадок целлюлозно-бумажной промышленности, не уступает товарным сорбентам природного происхождения (бентонитовая глина, низовой торф) и позволяет иммобилизовать подвижные формы тяжелых металлов, значительно снижая их концентрации. При этом происходит снижение класса опасности с II (высокоопасные отходы) на IV (малоопасные отходы). Также предлагаемый сорбент улучшает агрохимическое состояние земель за счет дополнительного внесения питательных элементов и органического вещества.

Заключение

Проведенные исследования показали, что полученный сорбент на основе вымороженных осадков шлам-лигнина ОАО «Байкальский ЦБК» имеет пористую структуру, в которой преобладают мезопоры, способные сорбировать на себе ионы тяжелых металлов, при этом большое количество микропор способствует возникновению процессов химической сорбции. Полученные ИК-спектры указывают на возможность химической сорбции свинца в результате реакции замещения атома водорода в различных гидроксильных группировках сорбента группы ароматических или карбоксильных структур. Экспериментально подтверждено, что полученный сорбент по своим сорбционным свойствам не уступает товарным природным сорбентам – бентонитовой глине и низовому торфу.

Таким образом, использование полученного сорбента из вымороженных лигнинсодержащих осадков ОАО «Байкальский ЦБК» позволит решить две важные экологические проблемы – утилизация крупнотоннажных лигнинсодержащих отходов целлюлозно-бумажной промышленности и рекультивация нарушенных земель, загрязненных высоким содержанием тяжелых металлов, в том числе свинцом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Muhammad A., Farouk N. The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: a review // *MOJ Ecology & Environmental Sciences*. – 2018. – Vol. 3 (4). – P. 265–268. DOI: 10.15406/mojes.2018.03.00098.
- Sperdouli I. Heavy metal toxicity effects on plants // *Toxics*. – 2022. – Vol. 10 (12):715. – P. 1–4.
- Ambika A., Mohnish P., Kumar N. Effect of heavy metals on plants: an overview // *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*. – 2016. – Vol. 5 (3). – P. 56–66. DOI: 10.13140/RG.2.2.27583.87204.
- Heavy metal tolerance in plants: role of transcriptomics, proteometabolomics, and ionomics / S. Samiksha, P. Parul, S. Rachana, S. Vijay, P. Sheo // *Frontiers in Plant Science*. – 2015. – Vol. 6. – 280 p. DOI: 10.3389/fpls.2015.01143.
- Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2021 году. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Гайфун», 2022. – 131 с.
- Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal polluted land / A. Yan, Y. Wang, S. Tan, Y. Mohd, S. Ghosh, Z. Chen // *Front Plant Sci*. – 2020. – Vol. 11 (359). – 15 p. DOI: 10.3389/fpls.2020.00359.
- Bhupendra K., Taak P. Chemical methods of soil remediation // *Biotechnological Strategies for Effective Remediation of Polluted Soils*. – 2018. – P. 77–84. DOI: 10.1007/978-981-13-2420-8_4.
- Radocaj D., Natalija V., Mladen J. The remediation of agricultural land contaminated by heavy metals // *Poljoprivreda*. – 2020. – Vol. 26. – P. 30–42. DOI: 10.18047/poljo.26.2.4.

9. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability / L. Lianwen, L. Wei, S. Weiping, G. Mingxin // *The Science of the total environment*. – 2018. – Vol. 633. – P. 206–219. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.161.
10. Орлов Д.С., Лыткин И.И. Сорбционная способность торфянистых почв и их роль в формировании состава почвенно-грунтовых вод // *Водные ресурсы*. – 1983. – № 1. – С. 81–93.
11. Spark K., Wells J., Johnson B. The interaction of a humic acid with heavy metals // *Australian Journal of Soil Research*. – 1997. – Vol. 35 (1). – P. 89–101. DOI: 10.1071/S96008.
12. Мамася Н.Н. Участие сложного компоста в миграции тяжёлых металлов в агроландшафте // *Экологический Вестник Северного Кавказа*. – 2017. – Т. 13. – № 1. – С. 80–87.
13. Технология переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности в почвогрунты с использованием естественных природных процессов / А.С. Шатрова, А.В. Богданов, А.И. Шкрабо, О.В. Алексеева // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 153–162. DOI: 10.18799/24131830/2022/8/3658.
14. Шатрова А.С., Богданов А.В. Использование почвогрунтов из осадков шлам-лигнина в качестве сорбента тяжёлых металлов при рекультивации загрязнённых земель // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2022. – № 4. – С. 52–64.
15. Лукин В.Д. Адсорбционные процессы в химической промышленности. – Л.: Химия, 1973. – 63 с.
16. Богданов А.В., Шатрова А.С., Тюкалова О.В. Оценка воздействия промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» Иркутской области на объекты окружающей среды // *Экология и промышленность России*. – 2022. – Т. 26. – № 3. – С. 52–57. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-3-52-57.
17. Михайлова О.С., Булаева Н.М., Мусихина Е.А. Мониторинг загрязнения тяжёлыми металлами почвенного покрова территории города Свирска // *Мониторинг. Наука и технологии*. – 2014. – № 4 (21). – С. 34–40.
18. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. – 132 с.
19. Tanaka K., Kimura Y. Theoretical analysis of crystallization by homogeneous nucleation of water droplets // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2019. – Vol. 21. – P. 2410–2418. DOI: 10.1039/c8cp06650g.
20. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. Химия почв. – М.: Изд-во Московского университета, 1985. – 558 с.
21. Корельская Т.А., Румянцев Т.И. Строение гумусовых кислот как функция выполнения ими экотекторной роли в отношении тяжёлых металлов // *Journal of Siberian Federal University*. – 2014. – № 7. – С. 139–150.
22. Осина К.В. Выявление закономерностей связывания гуминовых веществ торфов с тяжёлыми металлами и формами монтмориллонита: дис. ... канд. хим. наук. – Иваново, 2018. – 156 с.
23. Каюгин А.А., Черкашина Л.В., Шигабаева Г.Н. Спектроскопическая характеристика гуминовых кислот донных отложений // *Вестник ТюмГУ*. – 2008. – № 3. – С. 153–160.

Информация об авторах

Анастасия Сергеевна Шатрова, кандидат технических наук, докторант кафедры обогащения полезных ископаемых и инженерной экологии, научный сотрудник лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. shatrova.irk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8054-1680>

Андрей Викторович Богданов, доктор технических наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и инженерной экологии Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. bogdanovav@istu.edu; <https://orcid.org/0000-0002-7519-1126>

Ольга Васильевна Тюкалова, кандидат химических наук, доцент, научный сотрудник лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. olgaburlak1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2464-261X>

Поступила в редакцию: 18.06.2023

Поступила после рецензирования: 13.09.2023

Принята к публикации: 10.04.2024

REFERENCES

1. Muhammad A., Farouk N. The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: a review. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 2018, vol. 3 (4), pp. 265–268. DOI: 10.15406/mojes.2018.03.00098.
2. Sperdoui I. Heavy metal toxicity effects on plants. *Toxics*, 2022, vol. 10 (12):715, pp. 1–4.
3. Ambika A., Mohnish P., Kumar N. Effect of heavy metals on plants: an overview. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 2016, vol. 5 (3), pp. 56–66. DOI: 10.13140/RG.2.2.27583.87204.
4. Samiksha S., Parul P., Rachana S., Vijay S., Sheo P. Heavy metal tolerance in plants: role of transcriptomics, proteometabolomics, and ionomics. *Frontiers in Plant Science*, 2015, vol. 6, 280 p. DOI: 10.3389/fpls.2015.01143.
5. *Soil pollution of the Russian Federation with industrial toxicants in 2021*. Obninsk, Research and Production Association Typhoon Publ., 2022. 131 p. (In Russ.)

6. Yan A., Wang Y., Tan S., Mohd Y., Ghosh S., Chen Z. Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal polluted land. *Front Plant Sci*, 2020, vol. 11 (359), 15 p. DOI: 10.3389/fpls.2020.00359.
7. Bhupendra K., Taak P. Chemical methods of soil remediation. *Biotechnological Strategies for Effective Remediation of Polluted Soils*, 2018, pp. 77–84. DOI: 10.1007/978-981-13-2420-8_4.
8. Radocaj D., Natalija V., Mladen J. The remediation of agricultural land contaminated by heavy metals. *Poljoprivreda*, 2020, vol. 26, pp. 30–42. DOI: 10.18047/poljo.26.2.4
9. Lianwen L., Wei L., Weiping S., Mingxin G. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability. *The Science of the total environment*, 2018, vol. 633, pp. 206–219. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.03.161.
10. Orlov D.S., Lytkin I.I. Sorption capacity of peaty soils and their role in the formation of soil and groundwater composition. *Water Resources*, 1983, vol. 1, pp. 81–93. (In Russ.)
11. Spark K., Wells J., Johnson B. The interaction of a humic acid with heavy metals. *Australian Journal of Soil Research*, 1997, vol. 35 (1), pp. 89–101. DOI: 10.1071/S96008.
12. Mamas N.N. Participation of complex compost in the migration of heavy metals in the agricultural landscape. *The North Caucasus Ecological Herald*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 80–87. (In Russ.)
13. Shatrova A.S., Bogdanov A.V., Shkrabo A.I., Alekseeva O.V. Technology for processing waste of the pulp and paper industry into soil ground using natural processes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 153–162. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/8/3658.
14. Bogdanov A.V., Shatrova A.S. Use of soils from sediments of sludge-lignin as a sorbent of heavy metals in the reclamation of contaminated lands. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*, 2022, no. 4, pp. 52–64. (In Russ.)
15. Lukin V.D. *Adsorption processes in the chemical industry*. Leningrad, Khimiya Publ., 1973. 63 p. (In Russ.)
16. Bogdanov A.V., Shatrova A.S., Tyukalova O.V. Assessment of the impact of the industrial site of the former battery plant "Vostsibelemt" in the Irkutsk region on environmental objects. *Ecology and Industry of Russia*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 52–57. (In Russ.) DOI: 10.18412/1816-0395-2022-3-52-57.
17. Mikhaylova O.S., Bulaeva N.M., Musihina E.A. Monitoring of pollution by heavy metals of the soil cover of the territory of the city of Svirsk. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*, 2014, vol. 4, no. 21, pp. 34–40. (In Russ.)
18. Gavrilova N.N., Nazarov V.V. *Analysis of the porous structure based on adsorption data: textbook allowance*. Moscow, Mendeleev University of Chemical Technology Publ., 2015. 132 p. (In Russ.)
19. Tanaka K., Kimura. Y. Theoretical analysis of crystallization by homogeneous nucleation of water droplets. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2019, vol. 21, pp. 2410–2418. DOI: 10.1039/c8cp06650g.
20. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Suhanova N.I. *Soil chemistry*. Moscow, Moscow University Publ. House, 1985. 558 p. (In Russ.)
21. Korelskaya T.A., Rummyantseva T.I. Structure of humic acids as a function of their ecoprotective role in relation to heavy metals. *Journal of Siberian Federal University*, 2014, no. 7, pp. 139–150. (In Russ.)
22. Osina K.V. *Identification of patterns of binding of peat humic substances with heavy metals and forms of montmorillonite*. Cand. Diss. Ivanovo, 2018. 156 p. (In Russ.)
23. Kayugin A.A., Cherkashina L.V., Shigabaeva G.N. Spectroscopic characteristics of humic acids in bottom sediments. *Bulletin of Tyumen State University*, 2008, no. 3, pp. 153–160. (In Russ.)

Information about the authors

Anastasia S. Shatrova, Cand. Sc., Research Assistant, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. shatrova.irk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8054-1680>

Andrey V. Bogdanov, Dr. Sc., Professor, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. bogdanovav@istu.edu; <https://orcid.org/0000-0002-7519-1126>

Olga V. Tyukalova, Cand. Sc., Research Assistant, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. olgaburlak1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2464-261X>

Received: 18.06.2023

Revised: 13.09.2023

Accepted: 10.04.2024