

КОМПОЗИТНЫЕ СОРБЕНТЫ ИЗ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ: ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ

В. В. Юрак¹, Р. А. Апакашев¹, М. С. Лебзин¹, А. Н. Малышев¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: Статья посвящена исследованию адсорбции ионов тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) из модельных растворов с различной концентрацией ТММ при постоянной температуре окружающей среды (сорбенты – торф, осадки водоподготовки; тяжелые металлы и металлоиды – медь, мышьяк, свинец) и последующему построению изотерм адсорбции для исследуемых материалов и экспериментальных составов композитной смеси «торф – осадки водоподготовки». Цель исследования: выявить оптимальный состав композитного сорбционного материала на основе природного сырья и осадков водоподготовки, потенциально эффективный в отношении селективной иммобилизации ионов ТММ. Результаты экспериментов показали, что для «зеленой» утилизации осадков водоподготовки в смеси с торфом содержание осадков водоподготовки может достигать 80 масс. %. При этом отмечено сохранение сорбционной эффективности композитного материала в сравнении с исходными компонентами. Установлено, что изотермы адсорбции ионов Cu^{2+} , As^{3+} , Pb^{2+} на тестируемых материалах – торф, осадки водоподготовки и композитный сорбционный материал (торф – осадки водоподготовки в различных пропорциях), могут быть хорошо аппроксимированы прямыми линиями; это удостоверяет факт возможности использования наиболее часто применяемых моделей равновесной адсорбции: модели Фрейндлиха и модели Ленгмюра. Исследование подтверждает гипотезу о том, что «зеленая» утилизация техногенного продукта позволяет получить доступный и недорогой мелиорант, пригодный для рекультивации и одновременной ремедиации нарушенных земель, загрязненных ТММ.

Ключевые слова: сорбент, мелиорант, рекультивация, нарушенные земли, торф, осадки водоподготовки, адсорбция, оптимальный состав сорбента для рекультивации, изотерма адсорбции, модель Фрейндлиха, модель Ленгмюра.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–24–20102, <https://rscf.ru/project/22-24-20102/> при финансовой поддержке Правительства Свердловской области.

Для цитирования: Юрак В. В., Апакашев Р. А., Лебзин М. С., Малышев А. Н. Композитные сорбенты из природного и техногенного сырья: оптимизация состава для рекультивации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-1. – С. 177–191. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_177.

Composite sorbents from natural and man-made raw materials: optimization of composition for reclamation

V. V. Yurak¹, R. A. Apakashev¹, M. S. Lebzin¹, A. N. Malyshev¹

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, 620144, Russia

Abstract: The article explores the adsorption of heavy metals' and metalloids' (HMM) ions from model solutions with different concentrations of HMM at a constant ambient temperature (sorbents – peat, water treatment sludge; heavy metals: copper, arsenic, lead), and the subsequent construction of adsorption isotherms for the studied materials and experimental compositions of the composite mixtures “peat – water treatment sludge”. The purpose of the study: to identify the optimal composition of the composite sorption material based on natural raw materials and water treatment sludge, potentially effective in relation to the selective immobilization of HMM's ions. The results of the experiments showed that for the “green” disposal of water treatment sludge mixed with peat, the content of water treatment sludge can reach 80%. At the same time, the preservation of the sorption efficiency of the composite material in comparison with the initial components was noted. It has been established that adsorption isotherms of Cu^{2+} , As^{3+} , Pb^{2+} ions on the tested materials – peat, water treatment sludge and composite sorption material (peat – water treatment sludge in various ratios) can be well approximated by straight lines, which confirms the applicability of both the Freundlich model and the model Langmuir, which are the most commonly used models of equilibrium adsorption. The study confirms the hypothesis that the “green” utilization of a man-made product makes it possible to obtain an affordable and inexpensive meliorant suitable for reclamation and simultaneous remediation of disturbed lands contaminated with HMM.

Key words: sorbent, meliorant, reclamation, disturbed lands, peat, water treatment sludge, adsorption, optimal composition, adsorption isotherm, Freundlich model, Langmuir model.

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-24-20102, <https://rscf.ru/project/22-24-20102> / with the financial support of the Government of the Sverdlovsk region.

For citation: Yurak V. V., Apakashev R. A., Lebzin M. S., Malyshev A. N. Composite sorbents from natural and man-made raw materials: optimization of composition for reclamation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):177–191. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_177.

Введение

Экономическое развитие социума сопровождается целым рядом проблем, в числе которых — возрастание объемов различного рода опасных для биоты техногенных отходов. Наиболее токсичными в данном отношении выступают отходы, содержащие тяжелые металлы и металлоиды (ТММ). Тяжелые металлы и металлоиды (ТММ) представляют собой загрязнители-поллютанты, которые устойчивы к биологической и химической деградации, а также способны аккумулироваться в течение длительного времени в окружающей среде [1–5]. Опасность ТММ объясняется их токсичностью для всего живого, в том числе гумуса, флоры и фауны, а также человека как биологического вида, уже при относительно небольшой концентрации [6–8].

Именно поэтому разработка технологий, ограничивающих подвижность ТММ, набирает актуальность в последние десятилетия [9–11]. Снижение подвижности токсичных элементов в уже существующих технологиях достигается посредством иммобилизации ионов ТММ специальными веществами функционального назначения — сорбентами природного и техногенного происхождения. Такие сорбенты обеспечивают закрепление подвижных форм ТММ, следовательно, существенно снижают объемы их поступления в живые организмы.

В настоящее время сорбент-ориентированный подход нашел широкое применение в качестве инструмента восстановления нарушенных земель после антропогенной деятельности, в том числе после недропользования.

Это обусловлено тем, что естественная рекультивация почв, загрязненных ТММ, представляет собой очень длительный процесс: к примеру, период полураспада Pb, Cu и Cd равен 740–5900, 310–1500 и 13–110 лет соответственно [12].

Некоторые из традиционных методов дезактивации ТММ являются дорогостоящими и поэтому применяются для изоляции небольших и определенных загрязненных участков [13]. Это привело к тому, что в настоящее время исследователями из разных стран изучается эффективность различных сорбентов с целью дезактивации тяжелых металлов горнопромышленных [14–15] и др. предприятий. Интерес в данном случае представляют два типа материалов: 1) сорбенты природного происхождения в связи с их низкой ценой, высокой эффективностью и наличием больших запасов, а также возможностью выступать не только сорбентами, но и мелиорантами; 2) накопленные в больших количествах материалы, являющиеся результатом антропогенной деятельности. Из составляющих для разработки сорбентов-мелиорантов наибольший практический интерес представляет органическое сырье растительного происхождения, такое как торф, уголь, сапропели, отходы деревообработки и сельского хозяйства [16–18] и др. Также актуален вопрос об использовании осадков водоподготовки в качестве сырья для создания композитных сорбционных смесей, так как многочисленные исследования подтверждают возможность использования осадков водоподготовки в качестве сорбента [19–22], в том числе для целей «зеленой» утилизации данных отходов и снижения экологической нагрузки на экосистемы, в границах которых на текущий момент складывается этот вид отходов. Под осадками водоподго-

товки понимаются техногенные отходы, образующиеся в результате обработки воды, главным образом природного происхождения, перед непосредственной подачей в водопроводную сеть.

Несмотря на значительное количество работ по исследованию сорбционных характеристик материалов, как природных, так и техногенных [23–27], наблюдается отсутствие комплексного исследования сорбционной способности композитных смесей сорбентов. Текущее исследование представляет собой попытку сравнить сорбционную способность различных сорбентов и их композитных смесей для обоснования оптимального состава в целях последующей рекультивации нарушенных земель, загрязненных тяжелыми металлами и металлоидами. Цель исследования — выявить оптимальный состав композитного сорбционного материала на основе природного сырья и осадков водоподготовки, который будет эффективен в отношении селективной иммобилизации ионов ТММ. Цель обусловила выполнение следующих задач: 1) исследовать адсорбцию ионов ТММ из модельных растворов с различной концентрацией ТММ при постоянной температуре окружающей среды (природный сорбент — торф; техногенный материал — осадки водоподготовки; ТММ: медь, мышьяк, свинец); 2) построить изотермы адсорбции для исследуемых материалов и экспериментальных составов композитной смеси «природный мелиорант — осадки водоподготовки». Гипотеза исследования может быть сформулирована следующим образом: «зеленая» утилизация техногенного продукта позволит получить доступный и недорогой мелиорант, пригодный для рекультивации и одновременной ремедиации нарушенных земель, загрязненных ТММ.

Материалы

В данной работе были использованы:

1) нейтрализованный верховой торф, фракционированный (фракция 0–10). Показатель влажности варьируется от 50 до 60%, содержание гуминовых веществ 7,4 – 7,9 масс. %, рН = 5,5 – 6,0;

2) осадки водоподготовки Западной фильтровальной станции г. Екатеринбург.

Для отмеченных выше материалов природного и техногенного происхождения исследовали эффективность процесса адсорбции в отношении ионов ТММ — меди Cu^{2+} , свинца Pb^{2+} и мышьяка As^{3+} (в составе метаарсенит-иона AsO_2^-). Данные ионы негативно влияют на экологию окружающей среды и наиболее распространены на территории регионов с преобладанием промышленных предприятий горно-металлургического комплекса.

Для построения изотерм адсорбции исследовали связывание ионов ТММ при комнатной температуре из растворов с концентрацией от 0,1 ПДК в почве (предельно допустимая концентрация в почве населенных пунктов) до нескольких десятков ПДК.

Аналогично исследовали сорбционные свойства для экспериментальных составов композитного материала «природный мелиорант — осадки водоподготовки». Были изучены составы, указанные в таблице.

Методы

Эксперименты по определению сорбционных свойств сорбентов-мелиорантов проводили в статических условиях — раствор не перемешивали — и при комнатной температуре. Пробы композитных сорбционных смесей массой 25,00 г помещали в стеклянные колбы. После в данные колбы с исполь-

зованием мерной посуды добавляли 200,00 мл раствора соли тяжелого металла с определенной концентрацией. Выдерживали 130 минут, после фильтровали раствор через бумажный фильтр средней плотности. В целях определения концентрации ионов ТММ в растворах до и после адсорбции были использованы методы количественного анализа: атомно-абсорбционная спектрометрия и рентгеновская флуоресцентная спектрометрия. Для построения каждой изотермы готовили по пять растворов соли тяжелого металла различной концентрации.

Рентгеновскую флуоресцентную спектрометрию использовали для определения количественного содержания ионов Pb^{2+} и As^{3+} . Соответствующий анализ проводили с помощью рентгенофлуоресцентного кристалл-дифракционного сканирующего спектрометра «СПЕКТРОСКАН МАКС G». При выполнении анализа в качестве градуировочных образцов использовали стандартные растворы соответствующих солей. Погрешность рентгенофлуоресцентного анализа варьирует в пределах 0,2–3%.

Метод атомно-абсорбционной спектрометрии применяли для определения количественного содержания ионов Pb^{2+} и Cu^{2+} . В работе использовали атомно-абсорбционный спектрометр модели Spectr AA-240 FS (Varian Optical Spectr. Instrum, Australia). В качестве градуировочных образцов также использовали стандартные растворы с известным содержанием ионов ТММ. Метод атомно-абсорбционной спектрометрии характеризуется относительной погрешностью определения не хуже $\pm 2\%$. Для результатов определения содержания ионов свинца (II) различными методами отмечена воспроизводимость результатов, не выходящая за пределы погрешности использованных методик.

Экспериментальные составы композитного материала «природный мелиорант – осадки водоподготовки»

Experimental compositions of the composite material «natural meliorant – water treatment sludge»

№ п/п	Сорбент	Содержание компонентов (пропорция, масс. %)
1	ТОВ (торф – осадки водоподготовки)	20:80
2	ТОВ (торф – осадки водоподготовки)	40:60
3	ТОВ (торф – осадки водоподготовки)	60:40

Результаты

На рис. 1 представлены результаты исследований эффективности адсорбции ионов ТММ нейтрализованным торфом и осадками водоподготовки.

На основании проведённых экспериментов установлена сорбционная активность использованных материалов в отношении ионов ТММ. При этом степень адсорбции ионов Pb^{2+} нейтрализованным торфом составляет

55%. Это на 6% выше соответствующей величины для осадков водоподготовки. В случае адсорбции ионов As^{3+} эффективность нейтрализованного торфа на 16% выше, чем осадков водоподготовки. Наибольшее расхождение в эффективности адсорбции ионов ТММ торфом и осадками водоподготовки имеет место в случае ионов Cu^{2+} . По результатам проведенных исследований нейтрализованный торф практи-

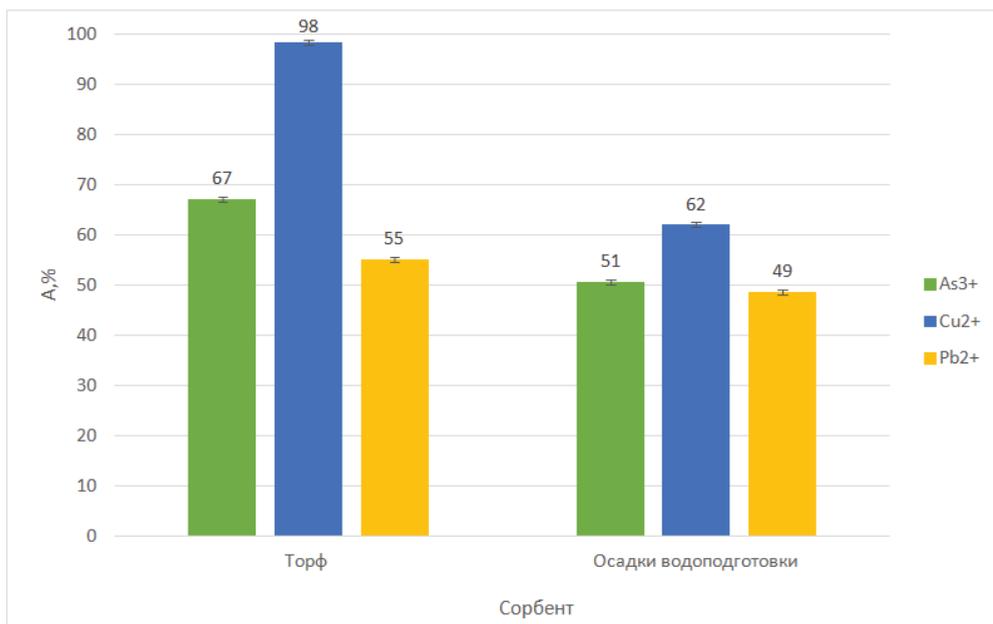


Рис. 1. Эффективность адсорбции ионов ТММ нейтрализованным торфом и осадками водоподготовки; A, % – степень адсорбции ионов тяжелых металлов из раствора

Fig. 1. Efficiency of adsorption of heavy metal ions by neutralized peat and water treatment sludge; A, % – the degree of adsorption of heavy metal ions from the solution

чески полностью, на 98%, связывает данные ионы из водного раствора. Для осадков водоподготовки соответствующий параметр составляет меньшую величину, равную 62%.

Для изучения возможности «зеленой» утилизации осадков водоподготовки в составе композитного материала с содержанием торфа исследовали иммобилизацию ионов Cu^{2+} , Pb^{2+} , As^{3+} сорбентами «торф – осадки водоподготовки» с различным содержанием компонентов (соответствующие пропорции, масс. % : 20/80, 40/60, 60/40). В результате проведенных экспериментов установлена зависимость величины адсорбции ионов ТММ от состава композитного материала, представленная на рис. 2.

Как следует из рис. 2, результаты экспериментов свидетельствуют

о сохранении высокой сорбционной эффективности композитного материала при увеличении содержания в нем осадков водоподготовки. Композит, содержащий наибольшую из изученных добавку осадков водоподготовки (80 масс. %), характеризует полное 100%-ное извлечение ионов меди из модельного раствора и самое высокое, равное 70%, связывание ионов свинца. Данные показатели сорбционной эффективности композитного материала не хуже, чем для торфа и осадков водоподготовки в индивидуальном состоянии (см. рис. 1). Исключение составляют ионы мышьяка. Нейтрализованный торф в индивидуальном состоянии связывает 67% данных ионов, а рассматриваемый композитный материал – 59%.

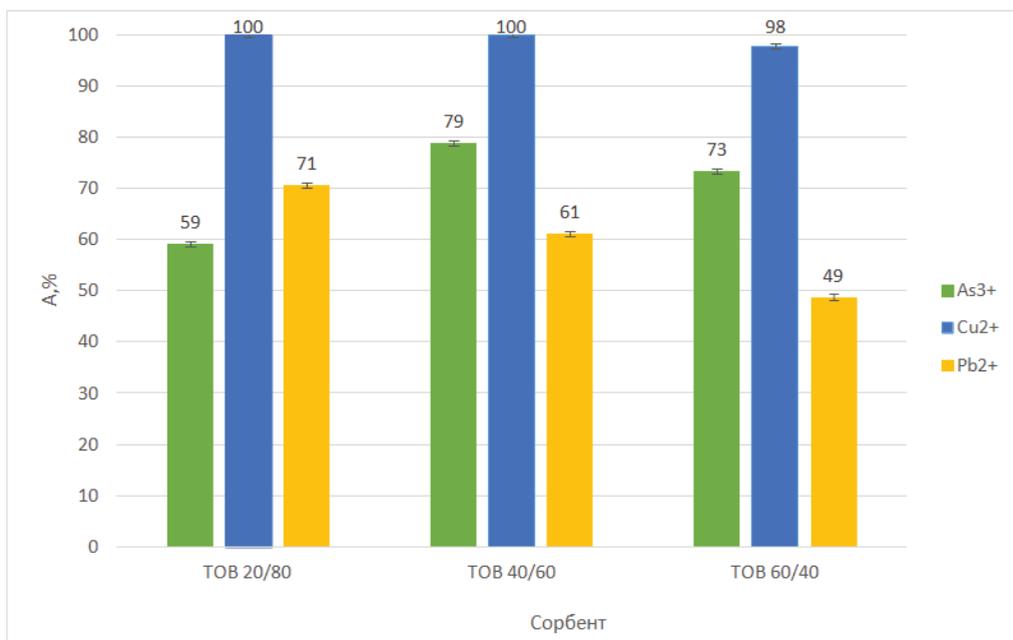


Рис. 2. Адсорбция ионов Cu^{2+} , Pb^{2+} , As^{3+} сорбентом торф – осадки водоподготовки (пропорции, масс. % – 20/80, 40/60, 60/40); A, % – степень адсорбции ионов Cu^{2+} , Pb^{2+} , As^{3+} , связанных сорбентом из раствора

Fig. 2. Adsorption of Cu^{2+} , Pb^{2+} , As^{3+} ions by peat sorbent – water treatment sludge (proportions, mass % – 20/80, 40/60, 60/40); A, % – the degree of adsorption Cu^{2+} , Pb^{2+} , As^{3+} ions bound by the sorbent from the solution

Равновесное состояние системы «раствор — твердая фаза», в которой происходят адсорбционные процессы при постоянной температуре и объеме, описывается различными уравнениями изотермы адсорбции. Среди наиболее распространенных изотерм адсорбции выделяют изотерму Фрейндлиха и изотерму Ленгмюра.

Изотерма Фрейндлиха (F):

$$F = k \cdot C^{1/n}, \quad (1)$$

где k — константа, связанная с адсорбционной емкостью сорбента; n — константа, зависящая от характера адсорбции (химическая/физическая); C — равновесная концентрация адсорбируемого вещества в растворе, моль/л.

Изотерма Ленгмюра (L):

$$L = \frac{L_{max} \times b \times C}{(b \times C + 1)}, \quad (2)$$

где L_{max} — максимальная адсорбционная емкость монослоя, моль/г; b — постоянная Ленгмюра для данной пары «адсорбент — адсорбат» (отношение констант скоростей десорбции и адсорбции); C — равновесная концентрация адсорбируемого вещества в растворе, моль/л.

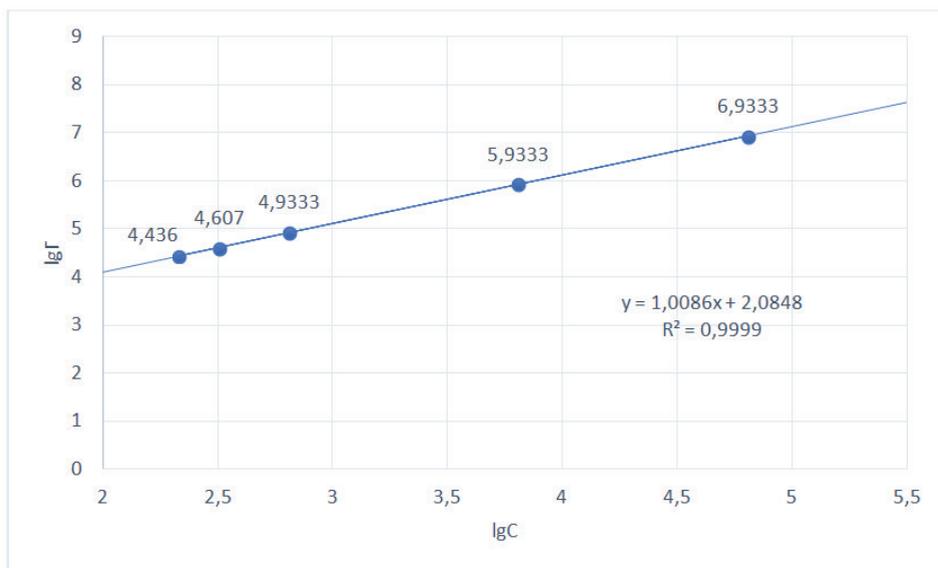
С целью анализа механизма адсорбции ионов ТММ были построены изотермы адсорбции ионов Cu^{2+} , As^{3+} , Pb^{2+} торфом, осадками водоподготовки и композитными сорбентами «природный мелиорант — осадки водоподготовки». На рис. 3 на примере ионов свинца (II) представлены типичные варианты аппроксимации изотерм адсорбции ионов ТММ прямыми линиями.

Из рис. 3 видно, что изотермы адсорбции аппроксимируются прямолинейной зависимостью как в координатах $\lg \Gamma = f(\lg C)$, так и в координатах $1/\Gamma = f(1/C)$ с высоким коэффициентом корреляции экспериментальных

точек (R^2), близким к единице. Это говорит о том, что адсорбция ионов ТММ на исследованных сорбентах носит комплексный характер, который не может быть описан в рамках одной модели. Комплексный характер адсорбции обусловлен сложным химическим составом сорбентов, обеспечивающим наличие активных центров адсорбции с различной энергией связи. В результате наблюдаемая адсорбция по энергии связывания может быть как физической, так и химической. Таким образом, подтверждается факт применимости обеих моделей — и Ленгмюра, и Фрейндлиха — для описания процесса адсорбции ионов ТММ. В соответствии с моделью Ленгмюра адсорбция локализована и идеально обратима. Согласно этому предположению, ионы ТММ адсорбируются монослоем только на свободных/не занятых местах поверхности сорбента, а десорбция частиц осуществляется только с занятых мест. Адсорбционный комплекс не перемещается вдоль поверхности адсорбента (адсорбция локализована). В свою очередь, в отличие от модели Ленгмюра, модель Фрейндлиха применяется для описания процесса адсорбции на гетерогенных поверхностях в нескольких слоях. Эта модель лучше описывает поведение аморфных или частично закристаллизованных сорбентов с непрерывным распределением поверхностных участков по адсорбционной активности.

Линейные формы изотерм наглядно показывают пригодность выбранного типа уравнения для аппроксимации экспериментальных данных. Отклонение от линейности в некоторой части графика может указывать на изменение механизма адсорбции или свидетельствовать о наличии сорбирующей поверхности с несколькими типами участков сорбционной активности.

a)



б)

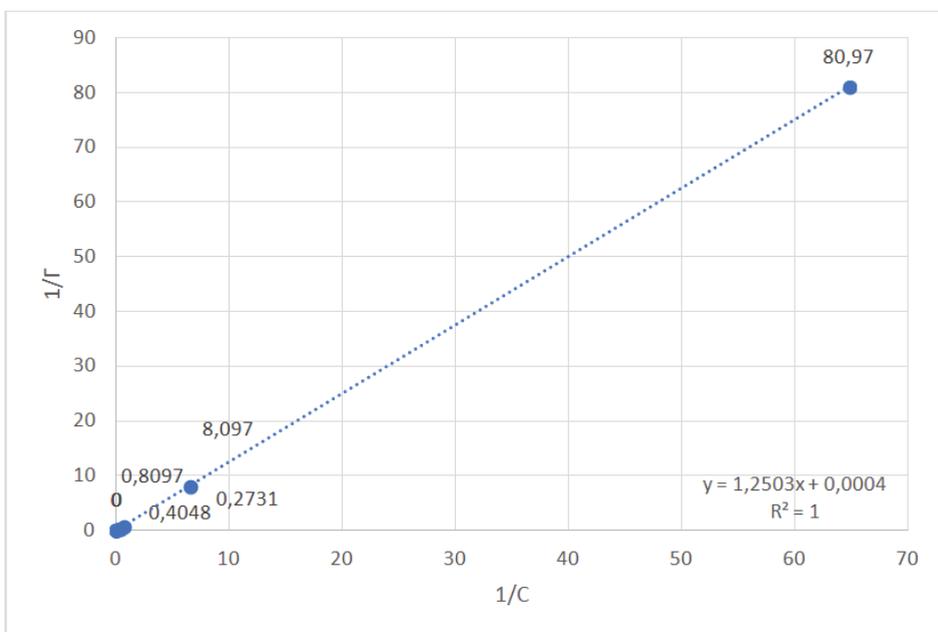
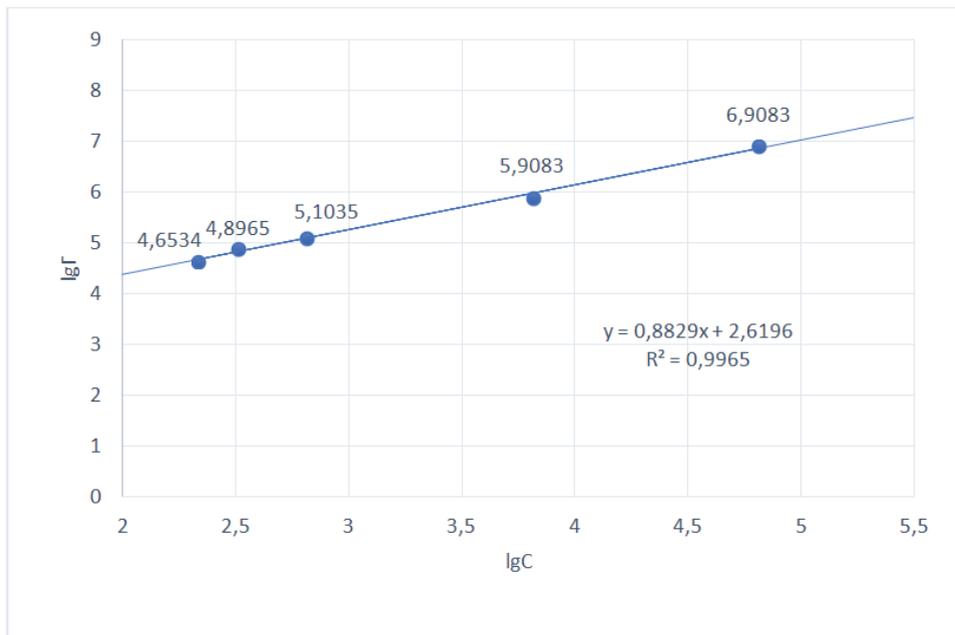


Рис. 3 (начало). Линеаризация изотерм адсорбции ионов свинца (II) в координатах $\lg\Gamma - \lg C$, $1/\Gamma - 1/C$; Γ – удельная адсорбция, моль/г; C – равновесная концентрация адсорбируемого вещества в растворе, моль/л. Сорбенты: а, б – торф; в, г – осадки водоподготовки; д, е – торф/осадки водоподготовки (40/60)

Fig. 3 (first). Linearization of adsorption isotherms of lead (II) ions in coordinates $\lg\Gamma - \lg C$, $1/\Gamma - 1/C$; Γ – specific adsorption, mol/g; C – equilibrium concentration of the adsorbed substance in solution, mol/l. Sorbents: a, b – peat; v, g – water treatment sludge; d, e – peat / water treatment sludge (40/60)

е)



з)

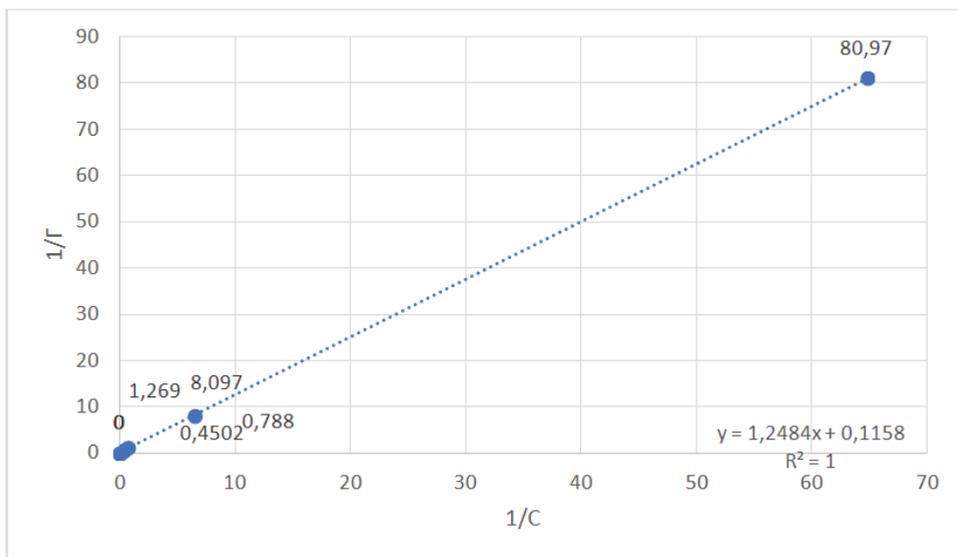
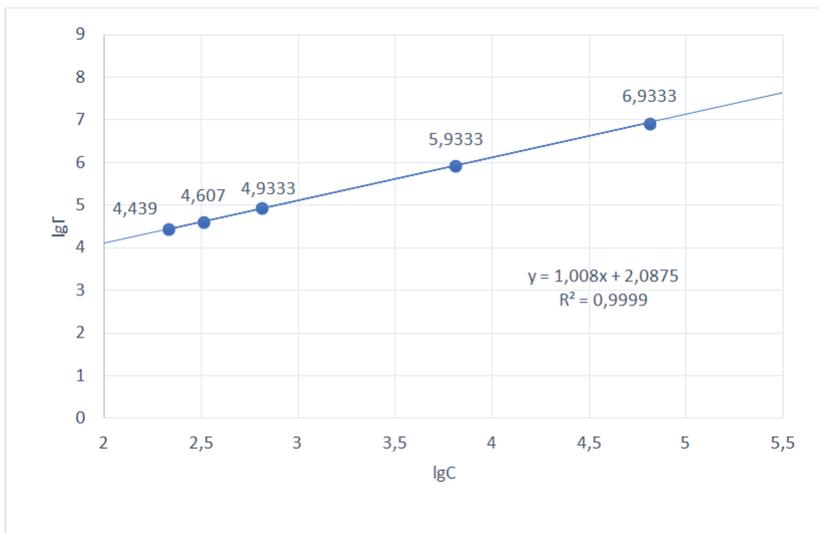


Рис. 3 (продолжение). Линеаризация изотерм адсорбции ионов свинца (II) в координатах $\lg\Gamma - \lg C$, $1/\Gamma - 1/C$; Γ – удельная адсорбция, моль/г; C – равновесная концентрация адсорбируемого вещества в растворе, моль/л. Сорбенты: а, б – торф; в, г – осадки водоподготовки; д, е – торф/осадки водоподготовки (40/60)

Fig. 3 (continuation). Linearization of adsorption isotherms of lead (II) ions in coordinates $\lg\Gamma - \log C$, $1/\Gamma - 1/C$; Γ – specific adsorption, mol/g; C – equilibrium concentration of the adsorbed substance in solution, mol/l. Sorbents: a, b – peat; v, g – water treatment sludge; d, e – peat / water treatment sludge (40/60)

д)



е)

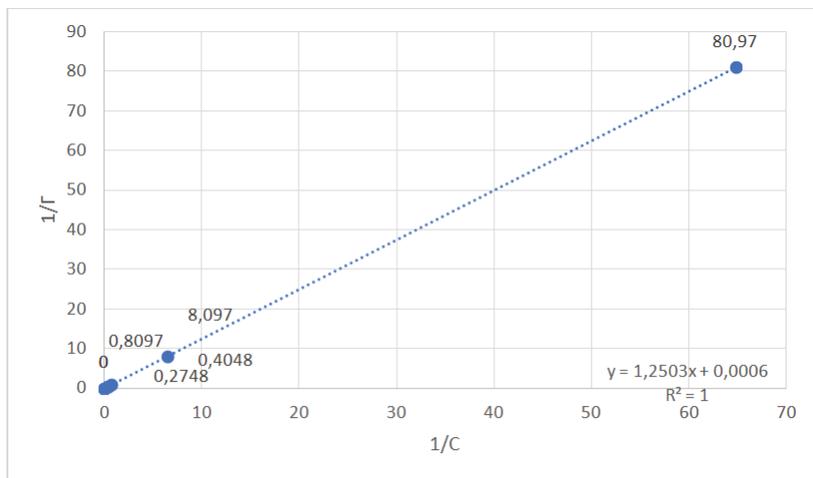


Рис. 3 (окончание). Линейзация изотерм адсорбции ионов свинца (II) в координатах $\lg\Gamma - \lg C$, $1/\Gamma - 1/C$; Γ – удельная адсорбция, моль/г; C – равновесная концентрация адсорбируемого вещества в растворе, моль/л. Сорбенты: а, б – торф; в, г – осадки водоподготовки; д, е – торф/осадки водоподготовки (40/60)

Fig. 3 (ending). Linearization of adsorption isotherms of lead (II) ions in coordinates $\lg\Gamma - \lg C$, $1/\Gamma - 1/C$; Γ – specific adsorption, mol/g; C – equilibrium concentration of the adsorbed substance in solution, mol/l. Sorbents: a, b – peat; v, g – water treatment sludge; d, e – peat / water treatment sludge (40/60)

Выводы

Полученные в ходе исследования научные результаты свидетельствуют о перспективности вторичного исполь-

зования осадков водоподготовки фильтровальных станций – продукта техногенного происхождения – в составе мелиорантов-сорбентов ТММ. Резуль-

таты проведенных экспериментов демонстрируют эффективность возможного использования композитного состава «торф — осадки водоподготовки» при содержании осадков водоподготовки до 80 масс. %. Соответствующая «зеленая» утилизация техногенного продукта позволяет получить доступный и недорогой мелиорант, пригодный для рекультивации и одновременной ремедиации больших по площади нарушенных земель, загрязненных ТММ.

В результате проведенных экспериментов установлено, что изотермы адсорбции ионов Cu^{2+} , As^{3+} , Pb^{2+}

на всех исследованных сорбционных материалах могут быть хорошо аппроксимированы прямыми линиями; это удостоверяет факт возможности использования наиболее часто применяемых моделей равновесной адсорбции: модель Фрейндлиха и модель Ленгмюра. Комплексный характер адсорбции обусловлен сложным химическим составом сорбентов, обеспечивающим наличие активных центров адсорбции с различной энергией связи. В результате наблюдаемая адсорбция по энергии связывания может быть как физической, так и химической.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селезнев А. А., Климшин А. В. Тяжелые металлы в грунтах на территории г. Екатеринбург // Известия Уральского государственного горного университета. — 2020. — Вып. 1(57). — С. 96–104. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-1-96–104.

2. Писарева А. В., Белопухов С. Л., Савич В. И., Степанова Л. П., Гукалов В. В., Яковлева Е. В., Шайхиев И. Г. Миграция тяжелых металлов от очага загрязнения в зависимости от взаимосвязей в ландшафте // Вестник технологического университета. — 2017. — Т.20. — № 6. — С. 160–163.

3. Bou Kheir R., Greve M., Greve M., Peng Y., Shomar B. A Comparative GIS tree-pollution analysis between arsenic, chromium, mercury, and uranium contents in soils of urban and industrial regions in Qatar // Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration. 2019, no. 4(10). DOI: 0.1007/s41207-019-0099-8.

4. Mikkonen H. G., Dasika G., Drake J. A., Wallis C. J., Clarke B. O., Reichman S. M. Evaluation of environmental and anthropogenic influences on ambient background metal and metalloid concentration in soil // Science of the total environment. 2018, vol. 624, pp. 599–610. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.131.

5. Ali H., Khan E. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term ‘heavy metals’ — Proposal of a comprehensive definition // Toxicol. Environ. Chem. 2018, vol. 100, pp. 6–19. DOI: 10.1080/02772248.2017.1413652.

6. Dutta S., Mitra M., Agarwal P., Mahapatra K., De S., Sett U., Roy S. Oxidative and genotoxic damages in plants in response to heavy metal stress and maintenance of genome stability // Plant Signal Behav. 2018, vol. 13(8), e1460048. DOI: 10.1080/15592324.2018.1460048.

7. Li L., Zhang Y., Ippolito J. A., Xing W., Qiu K., Yang H. Lead smelting effects heavy metal concentrations in soils, wheat, and potentially humans // Environ. Pollut. 2020, vol. 257, 113614. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113641.

8. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation // J. Chem. 2019, 6730305. DOI: 10.1155/2019/6730305.

9. *Chiampo F., Zacchini M.* (eds.). Environmental Restoration of Metal-Contaminated Soils // Special Issue published online in the open access journal Applied Sciences. 2021 (available at: <http://www.mdpi.com>). DOI: 10.3390/app112210805.

10. *Koptsik G. N.* Modern approaches to remediation of heavy metal polluted soils: A review // Eurasian Soil Science. 2014, vol. 47, pp. 707–722. DOI: 10.1134/S1064229314070072.

11. *Raffa C., Chiampo F., Shanthakumar S.* Remediation of Metal/Metalloid-Polluted Soils: A Short Review // Appl. Sci. 2021, vol. 11, 4134. DOI: 10.3390/app11094134.

12. *Nikovskaya G. N., Gruzina T. G., Ulberg Z. R., Koval L. A., Ovcharenko F. D.* Novel Approaches to Bioremediation and Monitoring of Soils Contaminated by Heavy Metals and Radionuclides // *Barany S.* (ed.) Role of Interfaces in Environmental Protection. NATO Science Series (Series IV: Earth and Environmental Sciences). 2003, pp. 529–536. DOI: 10.1007/978-94-010-0183-0_33.

13. *Singh A., Prasad S. M.* Remediation of heavy metal contaminated ecosystem: an overview on technology advancement // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2015, vol. 12, pp. 353–366. DOI: 10.1007/s13762-014-0542-y.

14. *Ignatyeva M., Yurak V., Pustokhina N.* Recultivation of post-mining disturbed land: review of content and comparative law and feasibility study // Resources. — 2020. — Т. 9. — № 6. — С. 73. DOI: 10.3390/RESOURCES9060073.

15. *Ignatyeva M. N., Yurak V. V., Dushin A. V., Polyanskaya I. G.* Assessing challenges and threats for balanced subsoil use // Environment, Development and Sustainability. 2021, vol. 23, no. 12, pp. 17904–17922. DOI: 10.1007/s10668-021-01420-1.

16. *Amirahmadi E., Hojjati S. M., Kammann C., Ghorbani M., Biparva P.* The Potential Effectiveness of Biochar Application to Reduce Soil Cd Bioavailability and Encourage Oak Seedling Growth // Appl. Sci. 2020, vol. 10, 3410. DOI: 10.3390/app10103410.

17. *Dhaliwal S. S., Singh J., Taneja P. K., Mandal A.* Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: A review // Environ. Sci. Pollut. Res. 2020, vol. 27, pp. 1319–1333. DOI: 10.1007/s11356-019-06967-1.

18. *Yurak V., Apakashev R., Dushin A., Usmanov A., Lebzin M., Malyshev A.* Testing of Natural Sorbents for the Assessment of Heavy Metal Ions' Adsorption // Appl. Sci. 2021, vol. 11, 3723. DOI: 10.3390/app11083723.

19. *Новоселова Л. Ю., Сироткина Е. Е., Погадаева Н. И.* Утилизация осадков водоподготовки в процессах извлечения нефти из водных сред // Нефтехимия. — 2008. — Т. 48. — № 1. — С. 65–68.

20. *Почтарёв А. Н., Кожемякин В. А.* Оксихлорид алюминия — коагулянт из осадков водоподготовки // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. — 2011. — № 3 (39). — С. 38–40.

21. *Новосёлова Л. Ю., Сироткина Е. Е.* Структура сорбентов на основе термически активированного железосодержащего осадка водоподготовки // Журнал физической химии. — 2010. — Т. 84. — № 6. — С. 1146–1151.

22. *Букин А. В., Моторин А. С., Игловиков А. В.* Создание рекультивационной смеси на основе осадка водоподготовки Няганьской ГРЭС и торфа // Агропродовольственная политика России. — 2016. — № 12 (60). — С. 70–75.

23. *Maharana M., Manna M., Sardar M., Sen S.* Heavy Metal Removal by Low-Cost Adsorbents. In: *Inamuddin, Ahamed M., Lichtfouse E., Asiri A.* (eds). Green Adsorbents to Remove Metals, Dyes and Boron from Polluted Water // Environmental Chemistry for a Sustainable World. 2021, vol. 49. DOI: 10.1007/978-3-030-47400-3_10.

24. *Нгуен Д. Т., Везенцев А. И., Соколовский П. В., Грейш А. А.* Адсорбция глифосата на углеродсодержащих материалах // Журнал физической химии. — 2021. — Т. 95. — № 6. — С. 928–932. DOI: 10.31857/S0044453721060194.

25. *Ракишев А. К., Веденяпина М. Д., Кулайшин С. А., Курилов Д. В.* Адсорбция салициловой кислоты из водной среды на микропористом гранулированном активирован-

ном угле // Химия твердого топлива. — 2021. — № 2. — С. 54–59. DOI: 10.31857/S0023117721020067.

26. Шумилова М. А., Петров В. Г. Адсорбция ионов цинка почвами Удмуртской республики // Теоретическая и прикладная экология. — 2021. — № 1. — С. 73–78. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-1-073-078.

27. Гуркова Е. А., Аюнова О. Д., Волобаев А. А., Кальная О. И. К вопросу об оценке загрязнения почв отходами горно-обогатительного комбината «Тувакобальт» (Тува) // Устойчивое развитие горных территорий. — 2019. — Т.11. — № 2(40). — С. 142–155. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-2-142-155. **РИАБ**

REFERENCES

1. Seleznev A. A., Klimshin A. V. Heavy metals in soils on the territory of Yekaterinburg. *Proceedings of the Ural State Mining University*. 2020, issue 1(57), pp. 96–104. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-1-96-104.

2. Pisareva A. V., Belopukhov S. L., Savich V. I., Stepanova L. P., Gukalov V. V., Yakovleva E. V., Shaikhiyev I. G. Migration of heavy metals from the source of pollution depending on the relationship in the landscape. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2017, vol. 20, no. 6, pp.160–163. [In Russ].

3. Bou Kheir R., Greve M., Greve M., Peng Y., Shomar B. A Comparative GIS tree-pollution analysis between arsenic, chromium, mercury, and uranium contents in soils of urban and industrial regions in Qatar. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2019, no. 4(10). DOI: 0.1007/s41207-019-0099-8.

4. Mikkonen H. G., Dasika G., Drake J. A., Wallis C. J., Clarke B. O., Reichman S. M. Evaluation of environmental and anthropogenic influences on ambient background metal and metalloids concentration in soil. *Science of the total environment*. 2018, vol. 624, pp. 599–610. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.131.

5. Ali H., Khan E. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term ‘heavy metals’ – Proposal of a comprehensive definition. *Toxicol. Environ. Chem.* 2018, vol. 100, pp. 6–19. DOI: 10.1080/02772248.2017.1413652.

6. Dutta S., Mitra M., Agarwal P., Mahapatra K., De S., Sett U., Roy S. Oxidative and genotoxic damages in plants in response to heavy metal stress and maintenance of genome stability. *Plant Signal Behav.* 2018, vol. 13(8), e1460048. DOI: 10.1080/15592324.2018.1460048.

7. Li L., Zhang Y., Ippolito J. A., Xing W., Qiu K., Yang H. Lead smelting effects heavy metal concentrations in soils, wheat, and potentially humans. *Environ. Pollut.* 2020, vol. 257, 113614. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113641.

8. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *J. Chem.* 2019, 6730305. DOI: 10.1155/2019/6730305.

9. Chiampo F., Zacchini M. (eds.). Environmental Restoration of Metal-Contaminated Soils. *Special Issue published online in the open access journal Applied Sciences*. 2021 (available at: <http://www.mdpi.com>). DOI: 10.3390/app112210805.

10. Koptsik G. N. Modern approaches to remediation of heavy metal polluted soils: A review. *Eurasian Soil Science*. 2014, vol. 47, pp. 707–722. DOI: 10.1134/S1064229314070072.

11. Raffa C., Chiampo F., Shanthakumar S. Remediation of Metal/Metalloid-Polluted Soils: A Short Review. *Appl. Sci.* 2021, vol. 11, 4134. DOI: 10.3390/app11094134.

12. Nikovskaya G. N., Gruzina T. G., Ulberg Z. R., Koval L. A., Ovcharenko F. D. Novel Approaches to Bioremediation and Monitoring of Soils Contaminated by Heavy Metals and Radionuclides. *Barany S. (ed.) Role of Interfaces in Environmental Protection. NATO Science Series (Series IV: Earth and Environmental Sciences)*. 2003, pp. 529–536. DOI: 10.1007/978-94-010-0183-0_33.

13. Singh A., Prasad S. M. Remediation of heavy metal contaminated ecosystem: an overview on technology advancement. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2015, vol. 12, pp. 353–366. DOI: 10.1007/s13762–014–0542-y.
14. Ignatyeva M., Yurak V., Pustokhina N. Recultivation of post-mining disturbed land: review of content and comparative law and feasibility study. *Resources*. – 2020. – Т. 9. – № 6. – С. 73. DOI: 10.3390/RESOURCES9060073.
15. Ignatyeva M. N., Yurak V. V., Dushin A. V., Polyanskaya I. G. Assessing challenges and threats for balanced subsoil use. *Environment, Development and Sustainability*. 2021, vol. 23, no. 12, pp. 17904–17922. DOI: 10.1007/s10668-021-01420-1.
16. Amirahmadi E., Hojjati S. M., Kammann C., Ghorbani M., Biparva P. The Potential Effectiveness of Biochar Application to Reduce Soil Cd Bioavailability and Encourage Oak Seedling Growth. *Appl. Sci.* 2020, vol. 10, 3410. DOI: 10.3390/app10103410.
17. Dhaliwal S. S., Singh J., Taneja P. K., Mandal A. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: A review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020, vol. 27, pp. 1319–1333. DOI: 10.1007/s11356-019-06967-1.
18. Yurak V., Apakashev R., Dushin A., Usmanov A., Lebzin M., Malyshev A. Testing of Natural Sorbents for the Assessment of Heavy Metal Ions' Adsorption. *Appl. Sci.* 2021, vol. 11, 3723. DOI: 10.3390/app11083723.
19. Novoselova L. Yu., Sirotkina E. E., Pogadaeva N. I. Utilization of water treatment sediments in the processes of oil extraction from aqueous media. *Petrochemistry*. 2008, vol. 48, no. 1, pp. 65–68. [In Russ].
20. Pochtarev A. N., Kozhemyakin V. A. Aluminum oxychloride – coagulant from water treatment sediments. *Vodoochistka. Water treatment. Water supply*. 2011, no. 3 (39), pp. 38–40. [In Russ].
21. Novosyolova L. Yu., Sirotkina E. E. The structure of sorbents based on thermally activated iron-containing sediment of water treatment. *Journal of Physical Chemistry*. 2010, vol. 84, no. 6, pp. 1146–1151. [In Russ].
22. Bukin A. V., Motorin A. S., Iglonikov A. V. Creation of a reclamation mixture based on the sludge from the water treatment of the Nyaganskaya TPP and peat. *Agro-food policy of Russia*. 2016, no. 12 (60), pp. 70–75. [In Russ].
23. Maharana M., Manna M., Sardar M., Sen S. Heavy Metal Removal by Low-Cost Adsorbents. In: Inamuddin, Ahamed M., Lichtfouse E., Asiri A. (eds) Green Adsorbents to Remove Metals, Dyes and Boron from Polluted Water. *Environmental Chemistry for a Sustainable World*. 2021, vol. 49. DOI: 10.1007/978–3-030–47400–3_10.
24. Nguyen D. T., Vezentsev A. I., Sokolovsky P. V., Greish A. A. Adsorption of glyphosate on carbon-containing materials. *Journal of Physical Chemistry*. 2021, vol. 95, no. 6, pp. 928–932. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0044453721060194.
25. Rakishev A. K., Vedenyapina M. D., Kulayshin S. A., Kurilov D. V. Adsorption of salicylic acid from an aqueous medium on microporous granular activated carbon. *Chemistry of solid fuel*. 2021, no. 2, pp. 54–59. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0023117721020067.
26. Shumilova M. A., Petrov V. G. Adsorption of zinc ions by soils of the Udmurt Republic. *Theoretical and applied ecology*. 2021, no. 1, pp. 73–78. [In Russ]. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-1-073–078.
27. Gurkova E. A., Ayunova O. D., Volobaev A. A., Kalnaya O. I. On the issue of assessing soil pollution by waste from the mining and processing plant “Tuvakobalt” (Tuva). *Sustainable development of mountain territories*. 2019, vol. 11, no. 2(40), pp. 142–155. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11–2-142–155.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрак Вера Васильевна — докт. экон. наук, доцент; доцент кафедры экономики и менеджмента, заведующая научно-исследовательской лабораторией рекультивации

нарушенных земель и техногенных объектов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Scopus Author ID: 57190411535; ORCID: 0000-0003-1529-3865; SPIN-код: 6822–2708 (ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, Куйбышева, 30; e-mail: vera_yurak@mail.ru);

Апакашев Рафаил Абдрахманович — докт. хим. наук, профессор; проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Scopus Author ID: 6603092433; ORCID: 0000-0002-9006-3667; SPIN-код: 8488–6615 (ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, Куйбышева, 30; e-mail: Apakashev.R@m.ursmu.ru);

Левзин Максим Сергеевич — младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, Уральский государственный горный университет, Россия, 620144, Екатеринбург, Куйбышева, 30, Scopus Author ID: 57218647741; ORCID: 0000-0001-5959-135X, science@ursmu.ru;

Малышев Александр Николаевич — лаборант-исследователь научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, Уральский государственный горный университет, Россия, 620144, Екатеринбург, Куйбышева, 30, ORCID: 0000-0002-3104-1687, malyshev.k1b@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yurak V. V., Dr. Sci. (Economic), associate professor; associate professor of the Department of Economics and Management, Head of the Research Laboratory of Disturbed Lands' and Technogenic Objects' Reclamation, The Ural State Mining University; Scopus Author ID: 57190411535; ORCID: 0000-0003-1529-3865; SPIN-код: 6822–2708 (The Ural State Mining University, Russia, 620144, Yekaterinburg, Kuybysheva st., 30, e-mail: vera_yurak@mail.ru).

Apakashev R. A., Dr. Sci. (Chemical), professor; Vice-Rector for Scientific Work, The Ural State Mining University; Scopus Author ID: 6603092433; ORCID: 0000-0002-9006-3667; SPIN-код: 8488–6615 (The Ural State Mining University, Russia, 620144, Yekaterinburg, Kuybysheva st., 30, e-mail: Apakashev.R@m.ursmu.ru);

Lebzin M. S., Junior Researcher, Research Laboratory for Reclamation of Disturbed Lands and Technogenic Objects, Ural State Mining University, Kuybysheva 30, Yekaterinburg, 620144, Scopus Author ID: 57218647741; ORCID: 0000-0001-5959-135X, Russia, science@ursmu.ru;

Malyshev A. N., laboratory assistant-researcher of the Research Laboratory for Reclamation of Disturbed Lands and Technogenic Objects, Ural State Mining University, 30, Kuybysheva st., Yekaterinburg, 620144, Russia, ORCID: 0000-0002-3104-1687, malyshev.k1b@gmail.com.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 02.10.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 02.10.2023; accepted for printing 10.11.2023.

