

ГИБРИДНЫЕ СОРБЕНТЫ – МЕЛИОРАНТЫ ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ МЫШЬЯКОМ ПОЧВ

Р. А. Апакашев¹, М. С. Лебзин¹, В. В. Юрак¹, Малышев А. Н.¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия, office@ursmu.ru

Аннотация: Мышьяк относится к химическим элементам, присутствующим в низких концентрациях практически во всех компонентах окружающей среды. При этом мышьяк не входит в число микроэлементов, необходимых для нормального функционирования живых организмов. Реальную угрозу для экосистем представляет содержание мышьяка в почвах в подвижной форме. Наличие мышьяка в подвижной форме может привести к увеличению площади распространения загрязнения прежде всего из-за высокой вероятности проникновения в грунтовые воды. В работе приведены результаты модельного тестирования гибридных сорбентов – мелиорантов в отношении иммобилизации водорастворимой формы мышьяка. Сформирован следующий ряд исследованных сорбентов по эффективности адсорбции мышьяка: торф/диатомит/вермикулит с различным количеством добавленного гидратированного оксида железа (III) > торф/диатомит/вермикулит > торф/диатомит/осадки водоподготовки > осадки водоподготовки. Установлено, что индивидуальное применение осадков водоподготовки в качестве сорбента или в смеси с другими веществами обеспечивает снижение содержания мышьяка в исходном растворе на величину 50% и более. Ремедиационный потенциал осадков водоподготовки может быть усилен совместным применением с такими веществами природного происхождения как торф и диатомит.

Ключевые слова: мышьяк, сорбенты, мелиоранты, рекультивация, торф, диатомит, вермикулит, осадки водоподготовки.

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: Апакашев Р. А., Лебзин М. С., Юрак В. В., Малышев А. Н. Гибридные сорбенты – мелиоранты для рекультивации загрязненных мышьяком почв // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11-1. – С. 18–28. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_18.

Hybrid sorbents – meliorants for recultivation of arsenic-contaminated soils

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

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: Arsenic is one of the chemical elements present in low concentrations in almost all environmental components. At the same time, arsenic is not among the trace elements necessary for the normal functioning of living organisms. A real threat to ecosystems is the content of arsenic in soils in a mobile form. The presence of arsenic in a mobile form can lead to

an increase in the area of contamination, primarily due to the high probability of penetration into groundwater. This paper presents the results of model testing of hybrid sorbents – meliorants in relation to the immobilization of the water-soluble form of arsenic are presented. The following series of studied sorbents according to the efficiency of arsenic adsorption was formed: peat/diatomite/vermiculite with different amounts of hydrated iron(III) oxide > peat/diatomite/vermiculite > peat/diatomite/water treatment sludge > water treatment sludge. It has been established that the individual use of water treatment sludge as a sorbent or in a mixture with other substances provides a 50% or more reduction in the arsenic content in the initial solution. The remediation potential of water treatment sludge can be enhanced by combined use with such substances of natural origin as peat and diatomite.

Key words: arsenic, sorbents, ameliorants, reclamation, peat, diatomite, vermiculite, water treatment sludge.

Acknowledgements: This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF № 22–24–20102, <https://rscf.ru/project/22–24–20102/> with the financial support of the Government of the Sverdlovsk region.

For citation: Apakashev R. A., Lebzin M. S., Yurak V. V., Malyshev A. N. Hybrid sorbents – meliorants for recultivation of arsenic-contaminated soils. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-1):18–28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_18.

Введение

В последние годы наблюдается растущее внимание к состоянию окружающей среды, связанное с ее загрязнением тяжелыми металлами и такими металлоидами, как мышьяк, способными оказывать высокое токсичное воздействие уже при малых концентрациях.

По современным оценкам, воздействию мышьяка из всего населения Земли постоянно подвергаются несколько миллионов человек [1]. Мышьяк может вызывать ряд негативных последствий для здоровья человека. Эпидемиологические исследования выявили тесную связь между воздействием мышьяка и повышенным риском канцерогенного и системного воздействия на здоровье человека [2]. Биологическая функция мышьяка в почве, как и многих тяжелых металлов, выражается в подавлении активности ферментов в 3–3,5 раза, что существенно снижает плодородие почвы [3].

Мышьяк относится к химическим элементам, присутствующим в низких концентрациях практически во всех компонентах окружающей среды [4].

При этом мышьяк не входит в число микроэлементов, необходимых для нормального функционирования живых организмов [5]. Реальную угрозу для экосистем представляет не валовое содержание мышьяка, а его содержание в подвижной форме. Основные неорганические формы мышьяка представляют собой арсенит – ион AsO_3^{3-} (металформа – AsO_2^-), содержащий трехвалентный мышьяк, и арсенат – ион AsO_4^{3-} , содержащий пятивалентный мышьяк. В первом случае, мышьяк, имеющий степень окисления +3, более подвижен, меньше адсорбируется и во много раз более токсичен, чем мышьяк в степени окисления +5 [6].

К основным источникам, способствующим локальному повышению концентрации мышьяка, относятся производственные отходы предприятий горнодобывающей и металлургической промышленности. При этом растущие объемы добычи и переработки полезных ископаемых как в России, так и на мировом уровне, способствуют увеличению количества ожидающих утилизации и переработки техноген-

ных отходов с последующей рекультивацией занимаемых ими земель. Природные явления, например, выветривание горных пород, также вносят свой вклад в загрязнение окружающей среды мышьяком.

С другой стороны, известны вещества — сорбенты, способные в значительной мере связывать мышьяк в малоподвижные формы, ограничивая его биологическую доступность. Основываясь на анализе мирового опыта, в настоящее время являются актуальными разработка и исследование функциональных гибридных материалов, таких как сорбенты — мелиоранты. Подобные вещества предназначены для селективной иммобилизации почвенных токсичных элементов и восстановления плодородия загрязненных техногенных территорий при их рекультивации.

Целью настоящей работы является изучение сорбционной эффективности гибридных сорбентов — мелиорантов для рекультивации почв, загрязненных мышьяком. Активные в отношении мышьяка сорбенты — мелиоранты должны связывать опасный токсикант, ограничивая его биологическую доступность, а также выступать в качестве компонентов недорогих агросоставов, обеспечивающих возможность мелиорации больших площадей рекультивируемых земель.

Материалы исследования

Возможность широкого практического применения сорбентов и мелиорантов определяется, прежде всего, их себестоимостью. В связи с этим является экономически обоснованным использование в составе гибридных сорбентов — мелиорантов доступных и недорогих материалов. Апробированное широкое применение торфа в качестве почвенного мелиоранта,

одновременно обладающего сорбционными свойствами, может служить основанием для его перспективного использования при разработке составов сорбентов — мелиорантов, являющихся стабилизаторами мышьяка при рекультивации и ремедиации нарушенных земель [7]. Гуминовые вещества, входящие в состав торфа, способны связывать различные виды токсичных веществ, образуя прочные комплексные соединения с металлами и устойчивые соединения с различными классами органических веществ [8].

Известны исследования, направленные на изучение возможности повторного применения компонентов промышленных отходов в качестве сорбентов — стабилизаторов тяжелых металлов [9, 10, 11, 12]. Многими физическими и химическими свойствами, потенциально предоставляющими возможность рационального повторного использования техногенных отходов, обладают осадки водоподготовки городских фильтровальных станций [13, 14].

Осадки водоподготовки образуются в результате обработки природной воды перед подачей в водопроводную сеть. В крупных городах значительная часть бюджета водоснабжающих предприятий идет на вывоз и депонирование данных осадков, образующихся в большом количестве. В общем случае осадок водоподготовки является нетоксичным веществом и поэтому часто утилизируется в качестве компонента почвогрунта.

Стратегия устойчивого развития предполагает правильное управление отходами, способное обеспечить малозатратное повторное их использование и снизить связанную с наличием отходов экологическую нагрузку на окружающую среду [9, 15]. Использование осадков водоподготовки в качестве техногенного вторичного сырья позволяет

решать две задачи — экологически безопасную «зеленую» утилизацию отходов, а также восстановление земель, нарушенных в результате деятельности горнопромышленных и металлургических предприятий.

В настоящей работе для тестирования сорбционной эффективности в отношении наиболее токсичного трехвалентного мышьяка были исследованы гибридные сорбенты — мелиоранты на основе торфа и таких распространенных природных веществ как диатомит и вермикулит. В качестве добавки к указанным веществам использовали осадки водоподготовки Западной фильтровальной станции г. Екатеринбурга. При проведении модельных экспериментов в качестве добавки также использовали синтезированный в лабораторных условиях гидратированный оксид трехвалентного железа $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$. Выбор оксида трехвалентного железа обусловлен его известной выраженной способностью к селективной адсорбции мышьяка [16].

Суммарно, в исследованиях использовали:

- торф верховой нейтрализованный, фракционированный (фракция 0–10), водородный показатель водной вытяжки (рН) 5,5–6,0;

- диатомит Камышловского месторождения. Данный материал используется для создания силикатных вяжущих, наполнителей, содержащих кремний, активированных сорбентов, строительных и огнеупорных материалов, для модификации агрохимических свойств почв и т.п.;

- вермикулит средней фракции (1–4 мм), вермикулит крупной фракции (5–10 мм). Вермикулит — минерал из группы гидрослюд, при термической обработке превращающийся в сыпучий чешуйчатый материал;

- осадки водоподготовки Западной фильтровальной станции г. Екатеринбурга. По результатам проведенного рентгенофазового анализа основную массу осадка (более 70%) составляет рентгеноаморфная органика. Химический состав осадков характеризуется наличием кремния, алюминия, железа. Гранулометрический состав осадков полидисперсен. Методом мокрого ситового анализа установлено, что преобладающая часть осадков водоподготовки представлена частицами с линейным размером менее 50 мкм (53%) и частицами размером более 100 мкм (44%);

- синтетический $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$, полученный взаимодействием сульфата трехвалентного железа $Fe_2(SO_4)_3$ и гидроксида аммония NH_4OH ;

- модельный раствор токсиканта — раствор метаарсенита натрия $NaAsO_2$ (классификация «чистый»). Для приготовления раствора необходимой концентрации расчетную навеску соли растворяли в мерной колбе. Из полученного исходного раствора путем разведения готовили растворы с меньшей концентрацией.

Смешиванием торфа, диатомита и вермикулита готовили композиционный материал с массовым соотношением компонентов 6:3:1. К части полученной смеси добавляли отфильтрованный осадок $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$ в соотношении 3:1 и 3:2. Из перечисленных выше смесей также формировали гранулы в шнековом грануляторе с дальнейшей сушкой в агрегате барабанного типа при температуре 80 °С. Температурную обработку заканчивали при уменьшении относительной влажности гранул до 25% (масс.).

Для экспериментальных исследований были приготовлены композиции гибридных сорбентов — мелиорантов, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Состав гибридных сорбентов – мелиорантов
Composition of hybrid sorbents – ameliorants

№	Шифр	Форма	Материальный состав	Пропорции при естественной влажности
1	ТДВ _{гр}	Гранулы	Торф, диатомит, вермикулит	6:3:1
2	ТДВ _{нгр}	Россыпь		
3	ТДВФ _{гр 3/1}	Гранулы	Торф, диатомит, вермикулит / Fe ₂ O ₃	3:1
4	ТДВФ _{нгр 3/1}	Россыпь		
5	ТДВФ _{гр 3/2}	Гранулы	Торф, диатомит, вермикулит / Fe ₂ O ₃	3:2
6	ТДВФ _{нгр 3/2}	Россыпь		
7	ТДОВ _{гр}	Гранулы	Торф /диатомит / осадки водоподготовки	5:2:3
8	ТДОВ _{нгр}	Россыпь		
9	ОВ	Россыпь	Осадки водоподготовки	1

Методы и результаты исследования

Исследование сорбционных свойств сорбентов проводили в статических условиях при комнатной температуре. Навески сорбентов массой 50,00 г (точность взвешивания ±0,01 г), помещали в стеклянные колбы достаточной емкости. В колбы с помощью мерного цилиндра приливали 300,0 мл раствора соли мышьяка с исходной концентрацией. По истечении 72 ч контакта компонентов системы «сорбент – раствор метаарсенита натрия» растворы из колб фильтровали через бумажный фильтр средней плотности.

Отметим, что в большинстве опубликованных в научной литературе результатов исследований эффективности сорбентов в отношении связывания мышьяка изучали адсорбцию из растворов с очень высоким содержанием мышьяка (около 100 мг/л), не характерным для реальных техногенных объектов [9]. При этом даже в случае высокой эффективности сорбента, обеспечивающего связывание, например, до 90% мышьяка, остаточная концентрация токсиканта в растворе на несколько порядков величины превышает его

допустимую концентрацию, составляющую, например, для воды 0,05 мг/л¹.

В настоящей работе для исследований готовили раствор с содержанием мышьяка примерно в три раза превышающем данную величину и составляющим 0,160 мг/л (в пересчете на ион As³⁺).

Для определения концентрации мышьяка в растворах до и после адсорбции использовали апробированный инструментальный метод количественного анализа – рентгеновскую флуоресцентную спектрометрию. Соответствующий анализ проводили с помощью рентгенофлуоресцентного сканирующего спектрометра «СПЕКТРОСКАН МАКС G». В качестве градуировочных растворов использовали стандартные растворы метаарсенита натрия. Стандартные растворы готовили по точной навеске исходного вещества (точность взвешивания ±0,0001 г), растворяемой в мерной колбе вместимостью 200,0 мл. Погрешность рентгенофлуоресцентного анализа варьирует в пределах 0,2 – 3%.

¹ Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. М.: Министерство здравоохранения России. 2002. 103 с.

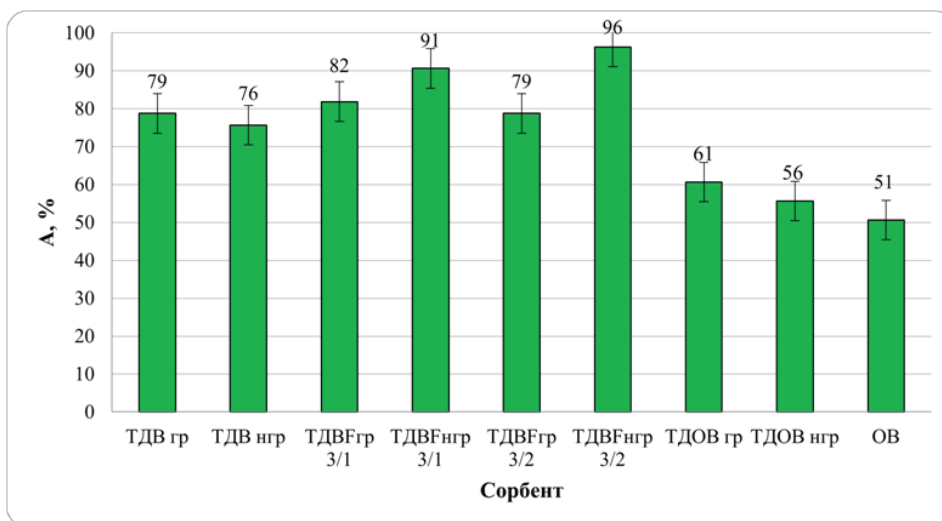


Рис. 1. Степень извлечения мышьяка (А, %) сорбентами. Состав и обозначение сорбентов соответствует табл. 1

Fig. 1. Degree of extraction of arsenic (A, %) by sorbents. The composition and designation of sorbents corresponds to Table. 1

На рис. 1 представлены результаты исследований степени извлечения мышьяка сорбентами в процентном отношении.

Из рис. 1 следует, что в отношении связывания ионов As^{3+} (в составе иона AsO_2) сорбенты проявляют разную эффективность. Максимальная адсорбция мышьяка имеет место в случае не гранулированного сорбента торф/диатомит/вермикулит с добавкой гидратированного оксида железа (III). Наибольшая степень извлечения мышьяка из раствора данным сорбентом отмечена при содержании $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$ в сорбенте в соотношении 3:2 (см. табл. 1) и составляет 96%. Тот же сорбент, содержащий одну часть $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$, связывает мышьяк практически в том же количестве. В обоих случаях соответствующие результаты перекрываются в пределах погрешности эксперимента.

Аналогично, в пределах погрешности эксперимента, равнозначен рассматриваемый показатель эффектив-

ности адсорбции мышьяка сорбентом торф/диатомит/вермикулит с добавкой одной части гидратированного оксида железа (III) как в гранулированном, так и в не гранулированном состоянии. При этом отмечается тенденция к большей степени адсорбции мышьяка сорбентами в не гранулированном состоянии и с увеличенным содержанием гидратированного оксида железа (III). Рассматриваемые сорбенты в не гранулированном состоянии имеют более развитую поверхность, что способствует адсорбции мышьяка. Другой фактор – увеличенное содержание в сорбенте гидратированного оксида железа (III) – также повышает эффективность процесса адсорбции мышьяка. Известно, что оксиды железа являются распространенными компонентами почв и вносят существенный вклад в процессы иммобилизации тяжелых металлов и мышьяка. Оксиды железа обладают высокой иммобилизующей способностью в отношении мышьяка как в форме арсената, так и арсенита

[17]. Соединения железа используют в качестве мелиорантов, а также для геохимических барьеров при закреплении тяжелых элементов [18].

Важной частью проведенных в настоящей работе исследований является изучение эффективности сорбционных свойств осадков водоподготовки. Осадки водоподготовки по своим физико-химическим свойствам подобны органоминеральным коллоидам, состоящим преимущественно из гумусовых веществ, осажденных форм гидроксидов железа и алюминия, а также оксида марганца. Одновременно присутствующие коллоидные частицы, гидроксиды и оксиды металлов обеспечивают возможность проявления осадком водоподготовки отмеченных сорбционных свойств. Известно, что осадки водоподготовки могут выступать в роли стабилизатора отдельных тяжелых металлов [14]. В результате проведенных экспериментов установлено, что осадки водоподготовки адсорбируют 51% находящегося в модельном растворе мышьяка.

Опубликованные в научной литературе исследования адсорбции мышьяка подтверждают, что основным адсорбентом ионов, содержащих мышьяк, является гидроксид трехвалентного железа. Гидроксид железа — эффективный регулятор миграции мышьяка в природной среде [19, 20]. Наличие гидроксида железа в осадках водоподготовки, по-видимому, в определенной мере коррелирует с их эффективностью в отношении адсорбции определенного количества мышьяка.

Количество адсорбированного мышьяка возрастает при комбинировании осадков водоподготовки с торфом и диатомитом. Пробное смешивание осадков водоподготовки с сорбентом торф/диатомит привело к увеличению степени извлечения мышьяка из рас-

творы на 10% для гибридного сорбента в не гранулированном состоянии и на 20% — в гранулированном. В последнем случае степень адсорбции мышьяка достигала 61%. Данный факт, а также наличие гумусовых веществ в составе осадков водоподготовки, свидетельствуют о возможности их использования в составе гибридных сорбентов — мелиорантов для восстановления плодородия и экологической безопасности нарушенных земель.

На рис. 2 представлены абсолютные значения концентрации мышьяка в исходном растворе после контакта с различными сорбентами.

Как видно из рис. 2 содержание мышьяка в исходном растворе в 3,2 раза превышает значение ПДК для питьевой воды. Содержание мышьяка уменьшается до значений меньше ПДК после контакта исходного раствора со следующими сорбентами: торф/диатомит/вермикулит в гранулированном и не гранулированном состоянии, а также — торф/диатомит/вермикулит в гранулированном и не гранулированном состоянии с различным количеством добавленного гидратированного оксида железа (III). Причем наименьшее остаточное содержание мышьяка в растворе практически в десять раз меньше ПДК отмечено в случае адсорбции токсиканта не гранулированным гибридным сорбентом торф/диатомит/вермикулит с добавкой гидратированного оксида железа (III) в соотношении 3:2.

Определенная эффективность в отношении сорбционной иммобилизации мышьяка установлена также в случае осадков водоподготовки. Индивидуальное применение осадков водоподготовки в качестве сорбента или в смеси с другими веществами обеспечивает 50% и более снижение содержания мышьяка в исходном растворе. Достижимые

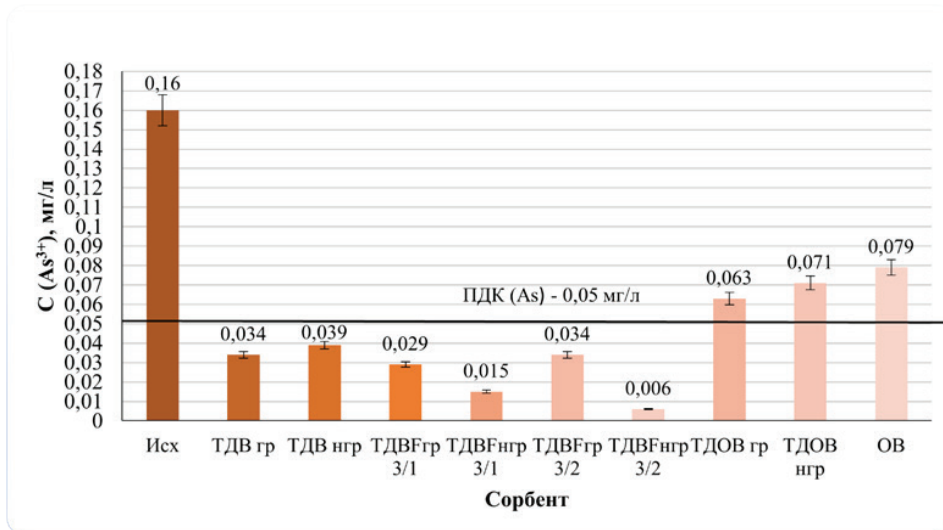


Рис. 2. Изменение концентрация мышьяка $C (As^{3+})$ в исходном растворе после контакта с сорбентами. Горизонтальная линия соответствует предельно допустимой концентрации (ПДК) мышьяка в питьевой воде

Fig. 2. Change in the concentration of arsenic $C (As^{3+})$ in the initial solution after contact with sorbents. The horizontal line corresponds to the maximum permissible concentration (MAC) of arsenic in drinking water

параметры содержания мышьяка превышают величину ПДК, но при этом, как показывают результаты проведенных экспериментов, варьирование состава гибридных сорбентов позволяет нивелировать это превышение.

Выводы

Результаты экспериментального тестирования позволяют сформировать следующий ряд исследованных сорбентов по эффективности адсорбции мышьяка: торф/диатомит/вермикулит с различным количеством добавлен-

ного гидратированного оксида железа (III) > торф/диатомит/вермикулит > торф/диатомит/осадки водоподготовки > осадки водоподготовки.

Установлено, что индивидуальное применение осадков водоподготовки в качестве сорбента или в смеси с другими веществами обеспечивает 50% и более снижение содержания мышьяка в исходном растворе. Ремедиационный потенциал осадков водоподготовки может быть усилен совместным применением с такими веществами природного происхождения как торф и диатомит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barbosa F. Toxicology of metals and metalloids: Promising issues for future studies in environmental health and toxicology // Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A. 2017. Vol. 80, no. 3. PP. 137–144. DOI: 10.1080/15287394.2016.1259475.
2. Медведев И. Ф., Деревягин С. С. Тяжелые металлы в экосистемах // Саратов: «Ракурс». — 2017. — 178 с.
3. Aponte H., Meli P., Butler B., Paolini J., Matus F., Merino C., Cornejo P., Kuzyakov Y. Meta-analysis of heavy metal effects on soil enzyme activities // Science of The Total Environment. 2020. Volume 737. P. 139744. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139744.

4. *Rehman K., Fatima F., Waheed I., Akash M. S.H.* Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences // *Journal of Cellular Biochemistry*. 2018. Vol. 119, No. 1. PP. 157–184. DOI: 10.1002/jcb.26234.

5. *Rosen E. M., Muñoz MG I., McElrath T., Cantonwine D. E., Ferguson K. K.* Environmental contaminants and preeclampsia: A systematic literature review // *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*. 2018. Vol. 21, No 5. PP. 291–319. DOI: 10.1080/10937404.2018.1554515.

6. *Gupta P.* Metals and micronutrients // *Illustrated Toxicology*. Elsevier. 2018. P. 195–223. DOI: 10.1016/B978-0-12-813213-5.00006-7.

7. *Антонинова Н. Ю., Усманов А. И., Собенин А. В., Горбунов А. А.* Исследование влияния торфо-диатомитового мелиоранта на формирование устойчивого травяного покрова при рекультивации нарушенных земель // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 5. — С. 131–141. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_131.

8. *Дмитриева Е. Д., Сяндюкова К. В., Леонтьева М. М., Глебов Н. Н.* Влияние pH среды на связывание ионов тяжелых металлов гуминовыми веществами и гиматомелановыми кислотами торфов // *Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки*. — 2017. — Т. 159 (4). — С. 575–588.

9. *Yun H.-S., Jang M., Shin W.-S., Choi J.* Remediation of arsenic-contaminated soils via waste-reclaimed treatment agents: Batch and field studies // *Minerals Engineering*. 2018. Vol.127. PP. 90–97. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.07.015.

10. *Kovacova Z., Demcak S., Balintova M., Pla C., Zinicovscaia I.* Influence of Wooden Sawdust Treatments on Cu(II) and Zn(II) Removal from Water // *Materials*. 2020. v. 13. P. 3575. DOI: 10.3390/ma13163575.

11. *Осипов А. И.* Известьесодержащие отходы и их использование для химической мелиорации почв // *Здоровье — основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения*. — 2018. — Т. 13. — № 2. — С. 981–988.

12. *Антонинова Н. Ю., Шубина Л. А., Шепель К. В., Собенин А. В., Усманов А. И.* Оценка возможности использования отходов производства при разработке мероприятий по иммобилизации тяжелых металлов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 5–1. — С. 46–55. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_46.

13. *Апакашев Р. А., Гуман О. М., Валиев Н. Г.* Рекультивация нарушенных земель с использованием техногенных осадков водоподготовки // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2020. — Т. 12, № 2(44). — С. 229–236. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-229-236.

14. *Turner T., Wheeler R., Stone A., Oliver I.* Potential Alternative Reuse Pathways for Water Treatment Residuals: Remaining Barriers and Questions — a Review // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2019. Vol. 230. P. 227. DOI: 10.1007/s11270-019-4272-0.

15. *Голик В. И., Разоренов Ю. И., Каргинов К. Г.* Основа устойчивого развития РСО-Алания — горнодобывающая отрасль // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2017. — Т. 9, № 2(32). — С. 163–172. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-2-163-171.

16. *Камалов К. О., Ахмаров Ф. И., Дубовцев Д. Ю.* Исследование способов удаления мышьяка из технологических растворов медеплавильного производства // *ОБЩЕСТВО. НАУКА. ИННОВАЦИИ (НПК-2021)*. Сборник статей XXI Всероссийская научно-практическая конференция. — 2021. — С. 173–179.

17. *Ahmad A., Rutten S., de Waal L., Vollaard P., van Genuchten C., Bruning H., Cornelissen E., van der Wal A.* Mechanisms of arsenate removal and membrane fouling in ferric based coprecipitation–low pressure membrane filtration systems // *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 241. P. 116644. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116644.

18. *Kasiuliene A., Carabante I., Bhattacharya P., Caporale A. G., Adamo P., Kumpiene J.* Removal of metal(oid)s from contaminated water using iron-coated peat sorbent // *Chemosphere*. 2018. Vol. 198. Pp. 290–296. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.01.139.

19. Pintor A. M.A., Vieira B. R.C., Santos S. C.R., Boaventura R. A.R., Botelho C. M.S. Arsenate and arsenite adsorption onto iron-coated cork granulates // *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 642. PP. 1075–1089. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.170.

20. Inam M. A., Khan R., Lee K. H., Akram M., Ahmed Z., Lee K. G., Wie Y. M. Adsorption Capacities of Iron Hydroxide for Arsenate and Arsenite Removal from Water by Chemical Coagulation: Kinetics, Thermodynamics and Equilibrium Studies // *Molecules*. 2021. Vol. 26, no. 22. P. 7046. DOI: 10.3390/molecules26227046. **MAE**

REFERENCES

1. Barbosa F. Toxicology of metals and metalloids: Promising issues for future studies in environmental health and toxicology. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2017. Vol. 80, no. 3. PP. 137–144. DOI: 10.1080/15287394.2016.1259475.

2. Medvedev I. F., Derevyagin S. S. Heavy metals in ecosystems. Saratov: “Foreshortening”. 2017. P. 178. [In Russ].

3. Aponte H., Meli P., Butler B., Paolini J., Matus F., Merino C., Cornejo P., Kuzyakov Y. Meta-analysis of heavy metal effects on soil enzyme activities. *Science of The Total Environment*. 2020. Volume 737. P. 139744. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139744.

4. Rehman K., Fatima F., Waheed I., Akash M. S.H. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of Cellular Biochemistry*. 2018. Vol. 119, no. 1. pp. 157–184. DOI: 10.1002/jcb.26234.

5. Rosen E. M., Muñoz M. I., McElrath T., Cantonwine D. E., Ferguson K. K. Environmental contaminants and preeclampsia: A systematic literature review. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*. 2018. Vol. 21, no. 5. pp. 291–319. DOI: 10.1080/10937404.2018.1554515.

6. Gupta P. Metals and micronutrients. *Illustrated Toxicology*. Elsevier, 2018. pp. 195–223. DOI: 10.1016/B978-0-12-813213-5.00006-7.

7. Antoninova N. Yu., Usmanov A. I., Sobenin A. V., Gorbunov A. A. Effect of peat-diatomite ameliorant on grass cover persistency in disturbed land reclamation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5):131–141. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_131

8. Dmitrieva E. D., Siundiukova K. V., Leontieva M. M., Glebov N. N. The effect of pH on the binding of heavy metal ions with humic substances and humatomelanic acids of peats. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2017, vol. 159, no. 4, pp. 575–588. [In Russ].

9. Yun H.-S., Jang M., Shin W.-S., Choi J. Remediation of arsenic-contaminated soils via waste-reclaimed treatment agents: Batch and field studies. *Minerals Engineering*. 2018. Vol.127. pp. 90–97. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.07.015.

10. Kovacova Z., Demcak S., Balintova M., Pla C., Zinicovskaia I. Influence of Wooden Sawdust Treatments on Cu(II) and Zn(II) Removal from Water. *Materials*. 2020. v. 13. P. 3575. DOI: 10.3390/ma13163575.

11. Osipov A. I. Lime containing waste and their use for chemical source melioration. Health is the basis of human potential: problems and ways to solve them. 2018. V. 13. no. 2. pp. 981–988. [In Russ].

12. Antoninova N. Yu., Shubina L. A., Shepel K. V., Sobenin A. V., Usmanov A. I. Assessment of the possibility of using industrial waste in the development of measures for the immobilization of heavy metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5-1):46–55. (In Russ). DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_46.

13. Apakashev R. A., Guman O. M., Valiev N. G. Reclamation of disturbed lands by means of technogenic water treatment sludge. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020. V. 12, no. 2(44). P. 229–236. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-229-236.

14. Turner T., Wheeler R., Stone A., Oliver I. Potential Alternative Reuse Pathways for Water Treatment Residuals: Remaining Barriers and Questions a Review. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2019. Vol. 230. P. 227. DOI: 10.1007/s11270-019-4272-0.

15. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Karginov K. G. Mining industry the basis for sustainable development of North Ossetia.. Sustainable Development of Mountain Territories. 2017. V.9, no. 2(32). pp. 163–172. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-2-163-171.

16. Kamalov K. O., Akhmarov F. I., Dubovtsev D. Yu. Investigation of methods of arsenic removal from technological solutions of copper smelting production. SOCIETY. SCIENCE. INNOVATIONS (NPC-2021). 2021. pp. 173–179. [In Russ].

17. Ahmad A., Rutten S., de Waal L., Vollaard P., van Genuchten C., Bruning H., Cornelissen E., van der Wal A. Mechanisms of arsenate removal and membrane fouling in ferric based coprecipitation–low pressure membrane filtration systems. Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 241. P. 116644. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116644.

18. Kasiuliene A., Carabante I., Bhattacharya P., Caporale A. G., Adamo P., Kumpiene J. Removal of metal(oid)s from contaminated water using iron-coated peat sorbent. Chemosphere. 2018. Vol. 198. pp. 290–296. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.01.139.

19. Pintor A. M. A., Vieira B. R. C., Santos S. C. R., Boaventura R. A. R., Botelho C. M. S. Arsenate and arsenite adsorption onto iron-coated cork granulates. Science of The Total Environment. 2018. Vol. 642. pp. 1075–1089. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.170.

20. Inam M. A., Khan R., Lee K. H., Akram M., Ahmed Z., Lee K. G., Wie Y. M. Adsorption Capacities of Iron Hydroxide for Arsenate and Arsenite Removal from Water by Chemical Coagulation: Kinetics, Thermodynamics and Equilibrium Studies. Molecules. 2021. Vol. 26, no. 22. pp. 7046. DOI: 10.3390/molecules26227046.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Апакашев Рафаил Абдрахманович*¹ — докт. хим. наук, профессор, e-mail: Apakashev.R@m.ursmu.ru, ORCID: 0000-0002-9006-3667;

*Либзин Максим Сергеевич*¹ — младший научный сотрудник, e-mail: az_ma@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5959-135X;

*Юрак Вера Васильевна*¹ — канд. экон. наук, доцент, e-mail: vera_yurak@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1529-3865;

*Малышев Александр Николаевич*¹ — лаборант-исследователь, e-mail: malyshev.k1b@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3104-1687;

¹ Уральский государственный горный университет, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, 620144.

Для контактов: *Апакашев Р. А.*, e-mail: Apakashev.R@m.ursmu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Apakashev R. A.*¹, Dr. Sci. (Chem.), Professor, e-mail: Apakashev.R@m.ursmu.ru; ORCID: 0000-0002-9006-3667;

*Lebzin M. S.*¹, Junior researcher of the research laboratory, e-mail: az_ma@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5959-135X;

*Yurak V. V.*¹, Cand. Sci. (Econ.), Associate professor, e-mail: vera_yurak@mail.ru; ORCID: 0000-0003-1529-3865;

*Malyshev A. N.*¹, Laboratory assistant-researcher, e-mail: malyshev.k1b@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3104-1687;

¹ Ural State Mining University, Russia, Yekaterinburg, str. Kuibyshev, 30, 620144.

For contacts: *Apakashev R. A.*, e-mail: Apakashev.R@m.ursmu.ru.

Получена редакцией 16.06.2022; получена после рецензии 14.09.2022; принята к печати 10.10.2022.

Received by the editors 16.06.2022; received after the review 14.09.2022; accepted for printing 10.10.2022.