

ВЛИЯНИЕ КИСЛОТНОСТИ СРЕДЫ НА ДЕСОРБЦИЮ ИОНОВ МЕДИ (II) ИЗ ПРИРОДНЫХ СОРБЕНТОВ

Р.А. Апакашев¹, А.Н. Малышев¹, М.С. Лебзин¹, В.С. Курмачева¹, Ю.Ф. Гордеева¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,
e-mail: malyshev.k1b@gmail.com

Аннотация: Задача создания функциональных сорбционных материалов на основе природного сырья, способных посредством защиты окружающей среды обеспечить сохранение здоровья и качества жизни человека от загрязнения тяжелыми металлами, является актуальной междисциплинарной проблемой. В качестве объектов исследования изучали ионы меди (II) – основного загрязнителя территорий, прилегающих к затопленным медным рудникам Уральского региона (Дегтярский, Левихинский и др.), и распространённые сорбенты природного происхождения – нейтрализованный верховой торф в гранулированном и негранулированном виде, а также диатомит и вермикулит. Рассмотрено влияние кислотности среды на эффективность иммобилизации ионов меди (II) выбранными сорбентами. На первом этапе исследований связывали ионы тяжелого металла из водного раствора с концентрацией, равной 10 предельно допустимым концентрациям ионов меди (II) в почве. Затем после фильтрования и просушивания сорбенты помещали в водную среду с исходным значением pH = 2, 4, 7, 8. Кислую среду создавали добавлением к дистиллированной воде азотной кислоты, щелочную среду – добавлением гидроксида натрия. Установлено наличие десорбции ионов меди (II) в случае торфа не гранулированного, а также диатомита и вермикулита в растворе с сильноокислой средой при значении pH = 2. При pH = 4, 7, 8 в пределах погрешности метода спектрофотометрии, использованного для определения концентрации ионов меди (II) в подвижной форме, десорбция не установлена. На основании результатов исследований предложен композитный сорбент – мелиорант на основе природных компонентов с добавкой оксида кальция для снижения кислотности среды и подавления процесса десорбции связанных ионов тяжелого металла.

Ключевые слова: природные сорбенты, торф, диатомит, вермикулит, тяжелые металлы, связывание, кислая среда, десорбция.

Благодарность: Исследование проведено в рамках реализации федеральной программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»).

Для цитирования: Апакашев Р. А., Малышев А. Н., Лебзин М. С., Курмачева В. С., Гордеева Ю. Ф. Влияние кислотности среды на десорбцию ионов меди (II) из природных сорбентов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 22–33. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_22.

The effect of environmental acidity on copper (II) ions desorption from natural sorbents

R.A. Apakashev¹, A.N. Malyshev¹, M.S. Lebzin¹, V.S. Kurmacheva¹, Yu.F. Gordeeva¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: malyshev.k1b@gmail.com

Abstract: The task of creating functional sorption materials based on natural raw materials capable of protecting human health and quality of life from heavy metal pollution through environmental protection is an urgent interdisciplinary problem. Copper (II) ions were studied as objects of research – the main pollutant of the territories adjacent to the flooded copper mines of the Ural region (Degtyarsky, Levikhinsky, etc.), and common sorbents of natural origin – neutralized peat in granular and non-granular form, as well as diatomite and vermiculite. The influence of the acidity of the medium on the effectiveness of immobilization of copper (II) ions by selected sorbents is considered. At the first stage of the research, heavy metal ions were bound from an aqueous solution with a concentration equal to 10 maximum permissible concentrations of copper (II) ions in the soil. Then, after filtration and drying, the sorbents were placed in an aqueous medium with an initial pH value of 2, 4, 7, 8. An acidic medium was created by adding nitric acid to distilled water, an alkaline medium by adding sodium hydroxide. The presence of desorption of copper (II) ions in the case of non-granular peat, as well as diatomite and vermiculite in a solution with a strongly acidic medium at pH = 2 has been established. At pH = 4, 7, 8, desorption has not been established within the error of the spectrophotometry method used to determine the concentration of copper (II) ions in mobile form. Based on the research results, a composite sorbent – meliorant based on natural components with the addition of calcium oxide is proposed to reduce the acidity of the medium and suppress the desorption of bound heavy metal ions.

Key words: natural sorbents, peat, diatomite, vermiculite, heavy metals, binding, acidic environment, desorption.

Acknowledgements: The research was funded as part of the implementation of the federal program for strategic academic leadership «Priority 2030» (Ural State Mining University).

For citation: Apakashev R. A., Malyshev A. N., Lebzin M. S., Kurmacheva V. S., Gordeeva Yu. F. The effect of environmental acidity on copper (II) ions desorption from natural sorbents. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12-1):22-33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_22.

Введение

Отходы предприятий горно-обогатительной и металлургической отраслей промышленности являются потенциальными источниками повышенной экологической нагрузки на природную среду. Территории, занятые отходами, в большинстве случаев деградируют и становятся малопригодными для нормального существования растений и животных,

одновременно представляя скрытую опасность для здоровья человека. Причем экологическая реабилитация естественным путем многих из подобных территорий затруднительна, она требовала бы проведения постоянного мониторинга состояния окружающей среды и существенных экономических вложений, как минимум, для локализации источников загрязнений этих территорий.

Часто в рассматриваемой ситуации основными загрязнителями природной среды выступают тяжелые металлы. В зависимости от химической активности их формы существования разделяют на подвижные и малоподвижные. К подвижной форме тяжелых металлов относят водорастворимую и обменную формы. Малоподвижными являются тяжелые металлы, входящие в состав нерастворимых соединений.

Тяжелые металлы теряют свою подвижность также в результате сорбционных процессов. В настоящее время соответствующий сорбент-ориентированный подход хорошо зарекомендовал себя в мировой практике [1, 2]. При этом отечественный и зарубежный опыт показывает, что приведение загрязненных почв к исходному состоянию, не говоря уже об увеличении плодородия и роста продуктивности сельскохозяйственных культур, возможно исключительно при нормализации кислотности среды и достаточном наличии как определенных минеральных, так и органических веществ.

Сорбент-ориентированный подход предполагает применение синтетических и природных сорбентов. В качестве природных сорбентов могут выступать определенные горные породы и составляющие их минералы, а также органические вещества. Известно большое количество способов модифицирования природного материала и придания ему заданных свойств [3]. Это позволяет значимо увеличить как селективность, так и количественный показатель адсорбции ионов тяжелых металлов. Следует отметить, что важным преимуществом природных сорбентов органического происхождения являются их мелиоративные свойства и возможность обогащения почвы органическим материалом. Органические материалы — долговременный, фундаментальный фактор стабилизации производства сельскохозяйственной продук-

ции. Они повышают общую устойчивость агроэкосистем к различным стрессорам и служат эффективным средством оздоровления почвы.

Задача создания функциональных сорбционных материалов на основе природного сырья, способных обеспечить сохранение здоровья и качества жизни человека посредством эффективной защиты от загрязнения окружающей среды подвижными формами тяжелых металлов, является актуальной междисциплинарной проблемой [4–6]. Самопроизвольное очищение почвы от тяжелых металлов, также как и прекращение их геохимической миграции, невозможны. Причем миграция тяжелых металлов ведет к их попаданию в грунтовые воды и расширению ареала загрязнения. Масштабность отмеченной задачи обусловлена ее отношением к приоритетной области рационального природопользования, связанной с восстановлением и возвращением в хозяйственный оборот земель, нарушенных в процессе добычи и переработки полезных ископаемых.

Причем важно указать на то, что использование с целью связывания и снижения миграционной активности ионов тяжелых металлов местного природного сырья является перспективным с экономической точки зрения для широкого применения в составе селективных сорбентов тяжелых металлов [7–9].

Сорбенты на основе природного сырья часто не уступают синтетическим сорбентам в эффективности связывания тяжелых металлов и при этом являются более доступными, а их применение оказывается более рентабельным [10]. Это снижает затраты на рекультивацию, не теряя в ее качестве. Часто важным преимуществом сорбентов на основе природных материалов являются их мелиоративные свойства, что позволяет вносить сорбенты в грунт без необходимости последующего изъятия [11, 12]. С другой

стороны, для широкого использования сорбентов на основе природных материалов необходимы исследования возможности их применения в различных условиях. Так, при изучении эффективности сорбционного связывания подвижных форм тяжелых металлов важным аспектом, требующим специального изучения, является влияние кислотно-основного характера загрязненной среды.

Необходимо отметить, что в литературе преимущественно рассматривается влияние кислотности среды на адсорбцию [13, 14], но процесс десорбции является не менее важной характеристикой, которую необходимо учитывать при оценке эффективности связывания ионов тяжелых металлов.

Цель работы — исследование влияния кислотности среды на десорбцию ионов меди (II) из сорбентов на основе природных материалов.

Материалы исследования

В качестве ионов тяжелого металла — объекта исследования — изучали ионы меди (II). Данные ионы являются основным загрязнителем больших по площади территорий, прилегающих к затопленным медным рудникам Уральского региона (Дегтярский, Левихинский и др.) [15, 16]. В настоящее время многие отработанные рудники являются объектами накопленного вреда окружающей среде. Излив кислых рудничных вод и отвалы под воздействием атмосферных осадков и грунтовых вод, как правило, становятся источниками загрязнения тяжелыми металлами подземных и поверхностных вод, а также почв. Воздействие токсикантов приводит к деградации растений и живых организмов.

Причем стоит отметить, что чем более длительно это влияние, тем больше времени будет необходимо для восстановления исходной среды обитания [17—19].

Непосредственно из-за изливов, которые носят циклический характер, происходит повышение кислотности. При этом понижение и повышение значения рН может происходить более чем на половину единицы за один сезон, в зависимости от условий окружающей среды.

В качестве базовых сорбентов природного происхождения использовали торф (верховой нейтрализованный в гранулированном и негранулированном виде), а также диатомит фракции 6—8 мм и вермикулит марки М-150 в воздушно-сухом состоянии. Торф формировали в гранулы в шнековом грануляторе с дальнейшей сушкой в сушилке барабанного типа при температуре 80 °С. Данные сорбенты выбраны в связи с их распространением в Уральском регионе, а также в связи с наличием присущих им адсорбционных и мелиоративных свойств.

Торф является универсальным природным материалом, способным существенно повысить плодородие почв. Кроме этого, торф является природным сорбентом ионов тяжелых металлов. Мелиоративные свойства, распространенность и, как правило, относительная доступность торфа при добыче позволяют использовать его в качестве основного вещества многокомпонентных сорбентов-мелиорантов, перспективных для восстановления нарушенных земель.

Диатомит и вермикулит модифицирующей обработке с целью улучшения их сорбционных свойств не подвергали.

Дополнительно из перечисленных сорбентов формировали композитный материал на основе торфа, содержащий диатомит и вермикулит в качестве разрыхлителей почвы, а также добавку оксида кальция с массовым соотношением компонентов 50:20:20:10 соответственно. Данный композит рассматривается в качестве универсального сорбента-мелиоранта с нормализованной кислотностью, который может быть использо-

ван для создания улучшенных условий произрастания растений на рекультивируемой территории [20]. Известь в составе композитного материала повышает рН, торф связывает ионы тяжелых металлов, а вермикулит и диатомит, помимо связывания данных ионов, дополнительно повышают мелиоративные свойства композитного материала.

Первоначально исследовали индивидуальную сорбционную эффективность сорбентов в отношении связывания ионов меди (II) в статических условиях (без перемешивания). Для этого навеску массой 25,0 г каждого сорбента при комнатной температуре помещали в стеклянную колбу. В колбы заливали по 200,0 мл раствора сульфата меди с концентрацией, соответствующей 10 предельно допустимым концентрациям иона меди (II) в почве. По истечении 72 ч сорбенты отфильтровывали для последующего просушивания при комнатной температуре.

Концентрацию тяжелого металла в фильтрате определяли методом спектрофотометрии. Использовали прибор ПЭ-5400ВИ при длине волны излучения

620 нм и оптическую кювету с рабочим расстоянием 30 мм. Спектрофотометр предварительно градуировали с помощью стандартных растворов соли меди. Стандартные растворы соли меди были приготовлены методом последовательного разбавления основного раствора. Для приготовления основного раствора сернокислую 5-водную медь высушивали при 11. С до безводного состояния, а затем отбирали навеску в мерную колбу на 1 л и растворяли в дистиллированной воде так, чтобы концентрация меди в полученном растворе была равна 1 мг/мл.

По разности исходной и остаточной концентрации рассчитывали количество меди, связанной сорбентом. При определении концентрации фильтрат подкисляли концентрированной азотной кислотой и оставляли на 3 ч для устранения влияния присутствующих органических соединений на поглощение. От фильтрата в мерную колбу отбирали аликвотную часть и добавляли 25%-ный раствор аммиака для образования оптически активных аммиакатов меди. При этом приборная погрешность / варьирование из-

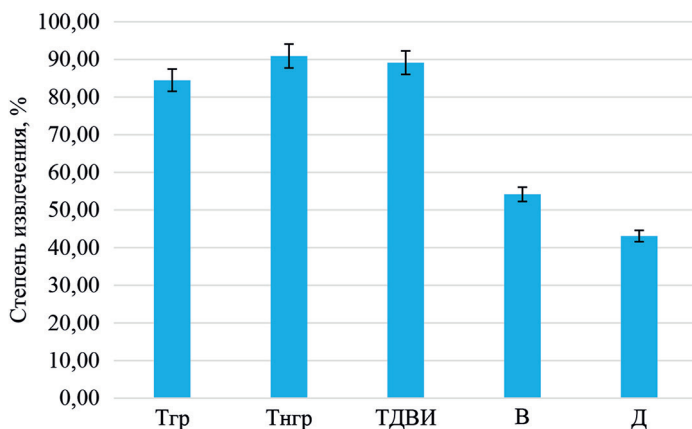


Рис. 1. Эффективность связывания ионов Cu^{2+} сорбентами из раствора сульфата меди (II) (продолжительность эксперимента 72 ч; сорбенты: торф гранулированный – $T_{гр}$, торф негранулированный – $T_{нгр}$, диатомит – Д, вермикулит – В, торф – диатомит – вермикулит – оксид кальция – ТДВИ)

Fig. 1. The efficiency of binding Cu^{2+} ions with sorbents from a solution of copper (II) sulfate (duration of the experiment 72 hours; sorbents: granulated peat – T_{gr} , non-granulated peat – T_{ngr} , diatomite – D, vermiculite – V, peat – diatomite – vermiculite – calcium oxide – TDVI)

мерений оптической плотности водных растворов возможно в диапазоне $\pm 0,005$.

Результаты

Результаты исследования эффективности сорбционных свойств природных сорбентов и композиционного материала на их основе приведены на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что наибольшую эффективность в отношении иммобилизации ионов меди (II) демонстрирует торф, как в индивидуальном состоянии (гранулированный и негранулированный), так и в составе композиционного материала. Доля связанных ионов меди (II) для каждого из этих сорбентов составляет величину около 90%. Высокий процент извлечения ионов тяжелого металла объясняется развитой сорбционно активной удельной поверхностью торфа [21]. Сорбционные свойства торфа обусловлены различными функциональными группами, такими как аминные, альдегидные, карбоксильные и др. Также сорбционная эффективность торфа во многом определяется присутствием гуминовых кислот, образующих трудно-растворимые гуматы меди и других тяжелых металлов [22, 7]. Торф с учетом

его хороших мелиоративных свойств является универсальной матрицей для создания различных вариаций композитных сорбентов на основе природного сырья [24–26].

Существенно меньшую в сравнении с торфом эффективность иммобилизации ионов меди (II) в проведенных экспериментах проявили вермикулит (54%) и диатомит (43%). Следует отметить, что поверхностное модифицирование вермикулита и диатомита, вызывающее образование дополнительных активных центров и радикалов, способно существенно повысить их сорбционные характеристики [27].

Сорбенты, использованные для связывания ионов меди (II), после просушки применили повторно для испытаний на устойчивость к процессу десорбции. Для этого четыре навески каждого сорбента по 25,0 г помещали отдельно в стеклянные колбы. Заранее готовили модельные водные растворы со значением $pH = 2, 4, 7, 8$. Сильнокислым и слабокислым растворами выступали растворы азотной кислоты с концентрацией $1,10^{-2}$ и $1,10^{-4}$ моль/л соответственно. В качестве слабощелочной среды исполь-

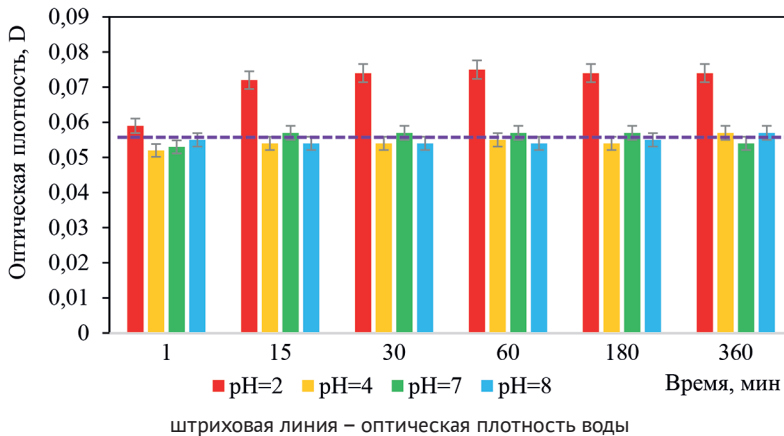


Рис. 2. Типичные результаты исследования процесса десорбции ионов меди (II) в модельных растворах с различным значением pH (сорбент – торф негранулированный)

Fig. 2. Typical results of the study of the desorption of copper (II) ions in model solutions with different pH values (sorbent is non-granulated peat)

зовали раствор гидроксида натрия с концентрацией $1,10^{-6}$ моль/л. Нейтральной средой выступала дистиллированная вода. По 200,0 мл каждого модельного раствора приливали в колбы к сорбентам. Затем в течение 360 мин проводили отбор проб модельных растворов для определения текущей концентрации десорбированных ионов меди (II) с целью оценки интенсивности процесса десорбции. Контроль pH модельных растворов вели потенциометрическим методом.

На рис. 2 на примере негранулированного торфа представлены полученные результаты, типичные также для диатомита и вермикулита. На данном рисунке отображено изменение оптической плотности растворов, изучаемых на предмет наличия десорбированных ионов меди (II), в зависимости от значения pH и времени контакта сорбента с модельной средой.

Результаты проведенных экспериментов демонстрируют, что в слабокислой, нейтральной и слабощелочной средах за изученный период времени не наблюдается десорбции ранее связанных ионов тяжелого металла. Данный вывод

сделан исходя из неизменяющегося значения оптической плотности модельных растворов в соответствующих экспериментах. Для результатов, представленных на рис. 2, следует учесть, что оптическая плотность дистиллированной воды на заданной длине волны и при использовании кюветы 30 мм составляет 0,053.

Рассмотренная ситуация меняется в сильнокислой среде при pH = 2. Установлено, что в такой среде на 15 мин эксперимента фиксируется существенный рост (на 32%) оптической плотности раствора, в котором находится диатомит, и на 22% — растворов с вермикулитом и негранулированным торфом.

Полученные результаты для диатомита, вермикулита и негранулированного торфа свидетельствуют о происходящей десорбции ионов меди (II) в сильнокислый раствор. В интервале от 15 до 30 мин имеет место дальнейший, но уже менее интенсивный, рост оптической плотности. Наблюдается стабилизация значений оптической плотности растворов. На основании полученных результатов следует, что в сильнокислой среде

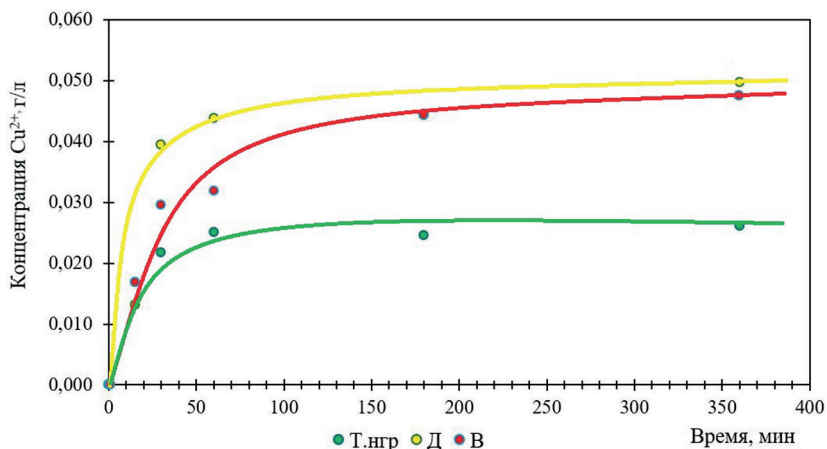


Рис. 3. Изменение концентрации ионов Cu^{2+} в процессе десорбции в сильнокислой среде при pH = 2 (сорбенты — торф негранулированный, диатомит, вермикулит)

Fig. 3. Changes in the concentration of Cu^{2+} ions during desorption in a strongly acidic medium at pH = 2 (sorbsents — non-granulated peat, diatomite, vermiculite)

при $pH = 2$ максимальная концентрация десорбированных ионов меди (II) достигается в первые 30 мин эксперимента.

Значения оптической плотности модельных растворов с $pH = 2$ были пересчитаны в концентрацию десорбированных ионов меди (II). Соответствующее графическое представление результатов приведено на рис. 3. На этом рисунке представлена концентрация десорбированных ионов тяжелого металла в зависимости от времени. Торф гранулированный и композиционный сорбент на основе торфа на рис. 3 отсутствуют. Это связано с тем, что оптическая плотность растворов, в которых находились данные сорбенты, за рассматриваемый период времени не превысила оптическую плотность дистиллированной воды.

Следует отметить различную интенсивность влияния среды на десорбцию ионов Cu^{2+} в случае природных сорбентов. Степень этого влияния различна. Наиболее выражено десорбция протекает в случае диатомита и вермикулита, умеренно — в случае торфа негранулированного. Количественно ситуация характеризуется следующими показателями.

После сорбции (см. рис. 1) удельное содержание ионов Cu^{2+} в диатомите составляло 1,9 мг $Cu^{2+}/г$, в вермикулите — 2,39 мг $Cu^{2+}/г$, в торфе гранулированном — 3,72 мг $Cu^{2+}/г$, в торфе негранулированном — 4,01 мг $Cu^{2+}/г$, в композитном сорбенте — 3,9 мг $Cu^{2+}/г$.

Соответственно, за фиксированный период времени (360 мин) степень десорбции для рассмотренных сорбентов различна: для торфа негранулированного — 5,23% от массы первоначально сорбированных ионов Cu^{2+} , для диатомита — 21,0%, для вермикулита — 22,24%. Для торфа гранулированного и композиционного сорбента десорбция ионов меди (II) в сильноокислой среде при $pH = 2$ в проведенных экспериментах не выявлена.

Выводы

Исследовано влияния кислотности среды на эффективность иммобилизации ионов тяжелого металла сорбентами на основе природных материалов.

Установлено, что концентрация десорбированных ионов меди (II) из природных сорбентов и композитного материала на их основе в слабоокислой, нейтральной и слабощелочной среде ($pH = 4, 6, 7, 8$) не превышает погрешности метода спектрофотометрии, использованного для количественного определения ионов тяжелого металла.

Ситуация меняется в сильноокислой среде ($pH = 2$). При данной кислотности среды для вермикулита, диатомита и торфа негранулированного фиксируется существенный рост оптической плотности раствора, что отвечает происходящей десорбции ионов меди (II) в раствор.

На основании полученных результатов следует, что в сильноокислой среде десорбция ионов меди (II) достигает максимума в первые 30 мин эксперимента. При этом переходят в подвижную форму от 5 до 22% ранее связанных ионов меди (II) в зависимости от вида сорбента. Наиболее сильно десорбция протекает в случае диатомита и вермикулита. Умеренно — в случае торфа негранулированного.

Для увеличения эффективности природных сорбентов и обеспечения их применения в условиях сильноокислых сред возможно внесение в их состав оксида кальция, что позволяет снижать кислотность среды и повышать эффективность связывания ионов тяжелого металла. Поэтому в результате проведенного исследования авторский композит торф — диатомит — вермикулит — оксид кальция из всех рассмотренных сорбентов является наиболее эффективным в отношении снижения кислотности среды и подавления процессов десорбции ионов меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукин С. В., Селюкова С. В. Агроэкологическая оценка влияния органических удобрений на микроэлементный состав почв // Достижения науки и техники АПК. — 2016. — № 30 (12). — С. 61–65.
2. Водяницкий Ю. Н. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. — М., 2009. — 96 с.
3. Дудина С. Н. Модифицирование сорбентов на основе природных глинистых материалов // Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки. — 2013. — № 24 (167). — С. 131–134.
4. Соколовский П. В. Разработка состава и определение коллоидно-химических характеристик композиционного сорбента на основе продуктов пиролиза отходов шелушения технических и зерновых сельскохозяйственных культур и монтмориллонит содержащих глин: автореф. диссертации на соискание канд. техн. наук. — Белгород: НИУ БелГУ, 2016. — 21 с.
5. 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.
6. Turner T., Wheeler R., Stone A., Oliver I. Potential alternative reuse pathways for water treatment residuals: Remaining barriers and questions — a review // Water, Air, & Soil Pollution. 2019, vol. 230, no. 9, pp. 1–30. DOI: 10.1007/s11270-019-4272-0.
7. Bilal M., Ihsanullah I., Younas M., Ul Hassan Shah M. Recent advances in applications of low-cost adsorbents for the removal of heavy metals from water: A critical review // Separation and Purification Technology. 2021, vol. 278, article 119510. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119510.
8. Levy-Ontman O., Yanay C., Alfi Y., Paz-Tal O., Wolfson A. Selective sorption of heavy metals by renewable polysaccharides // Polymers. 2023, vol. 15, article 4457. DOI: 10.3390/polym15224457.
9. Richards S., Dawson J., Stutter M. The potential use of natural vs commercial biosorbent material to remediate stream waters by removing heavy metal contaminants // Journal of Environmental Management. 2019, vol. 231, pp. 275–281. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.019.
10. De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment. A review // Sustainable Materials and Technologies. 2016, vol. 9, pp. 10–40. DOI: 10.1016/j.susmat.2016.06.002.
11. Копчик Г. Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. — 2014. — № 7. — С. 851–868.
12. Слуковская М. В., Иванова Л. А., Горбачева Т. Т., Дрогобужская С. В., Иноземцева Е. С., Марковская Е. Ф. Изменение свойств техногенно загрязненного грунта при использовании карбонатитового мелиоранта в зоне воздействия медно-никелевого комбината // Труды Карельского научного центра РАН. — 2013. — № 6. — С. 133–141.
13. Elboughdiri N. The use of natural zeolite to remove heavy metals Cu (II), Pb (II) and Cd (II), from industrial wastewater // Journal Cogent Engineering. 2020, vol. 7, no. 1. DOI: 10.1080/23311916.2020.1782623.
14. Weng C.-H., Sharma Y. C., Chu S.-H. Adsorption of Cr(VI) from aqueous solutions by spent activated clay // Journal of Hazardous Materials. 2008, vol. 155, no. 1-2, pp. 65–75. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.029.
15. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Наволокина В. Ю. Оценка влияния затопленного Левихинского медноколчеданного рудника на качество поверхностных вод реки Тагил // Проблемы недропользования. — 2019. — № 3(22). — С. 155–161.
16. Елохина С. Н. Техногенез затопленных рудников Урала. Автореф. диссертации ... доктора геолого-минералогических наук. — Екатеринбург: УГГУ, 2014. — 43 с.
17. Белозерцева И. А., Гранина Н. И. Воздействие разведки, добычи и переработки полезных ископаемых на почвы Сибири // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 10-2. — С. 238–242.
18. Рыбникова Л. С., Наволокина В. Ю. Обоснование мероприятий по минимизации воздействия кислых шахтных вод на гидросферу (на примере Левихинского медноколчеданного месторождения, Свердловская обл.) // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-2. — С. 245–256. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_245.

19. Янин Е. П. Экологические последствия разработки месторождений цветных и редких металлов. Аналитический обзор // Экологическая экспертиза. — 2020. — № 1. — С. 2–82. DOI: 10.36535/0869-1010-2020-01-1.

20. Кислицына А. П., Фигурин В. А. Влияние извести и минеральных удобрений на агрохимические показатели почвы и продуктивность лядвенце-timoфеечной травосмеси // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. — 2021. — № 3. — С. 367–375. DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.3.367-375.

21. Абуова Г. Б., Давыдова Е. В. Общая характеристика сорбентов, используемых для улучшения работы очистных сооружений // Перспективы развития строительного комплекса. — 2015. — № 1. — С. 362–366.

22. Lodygin E. D., Alekseev I. I., Vasilevich R. S., Abakumov E. V. Complexation of lead and cadmium ions with humic acids from arctic peat soils // Environmental Research. 2020, vol. 191, article 110058. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110058.

23. Кузнецова И. А., Ларионов Н. С. Химический состав и сорбционные свойства торфа — основа ресурсного потенциала типичных верховых болот северо-запада России // Успехи современного естествознания. — 2018. — № 7. — С. 165–170. DOI: 10.17513/use.36820.

24. Гаврилов С. В., Канарская З. А. Адсорбционные свойства торфа и продуктов на его основе // Вестник Казанского технологического университета. — 2015. — № 2. — С. 422–427.

25. 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.

26. Kasiulienė 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.

27. Нгуен Вьет Кьонг, Короткова П. С., Ханмамедова Э. Н., Григорьева Л. С. Модифицированные сорбенты на основе диатомитов // Вестник МГСУ. — 2019. — Т. 14 (7). — С. 862–869. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.862-869. **МИАБ**

REFERENCES

1. Lukin S. V., Selyukova S. V. Agroecological assessment of the effect of organic fertilizers on the microelement composition of soils. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2016, no. 30 (12), pp. 61–65. [In Russ].

2. Vodyanitskiy Yu. N. *Tyazhelye i sverkhtyazhelye metally i metalloidy v zagryaznennykh pochvakh* [Heavy and superheavy metals and metalloids in polluted soils], Moscow, 2009, 96 p.

3. Dudina S. N. The modification of sorbents based on natural clay materials. *Belgorod state university scientific bulletin. Natural sciences*. 2013, no. 24 (167), pp. 131–134. [In Russ].

4. Sokolovskiy P. V. *Razrabotka sostava i opredelenie kolloidno-khimicheskikh kharakteristik kompozitsionnogo sorbenta na osnove produktov piroliza otkhodov shelusheniya tekhnicheskikh i zernovykh sel'skokhozyaystvennykh kul'tur i montmorillonit soderzhashchikh glin* [Development of the composition and determination of colloidal and chemical characteristics of a composite sorbent based on pyrolysis products of peeling waste from industrial and grain crops and montmorillonite containing clays], Candidate's thesis, Belgorod, NIU BelGU, 2016, 21 p.

5. 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, no. 5-1, pp. 46–55. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_14_93_2022_51_0_46.

6. Turner T., Wheeler R., Stone A., Oliver I. Potential alternative reuse pathways for water treatment residuals: Remaining barriers and questions — a review. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2019, vol. 230, no. 9, pp. 1–30. DOI: 10.1007/s11270-019-4272-0.

7. Bilal M., Ihsanullah I., Younas M., Ul Hassan Shah M. Recent advances in applications of low-cost adsorbents for the removal of heavy metals from water: A critical review. *Separation and Purification Technology*. 2021, vol. 278, article 119510. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119510.

8. Levy-Ontman O., Yanay C., Alfi Y., Paz-Tal O., Wolfson A. Selective sorption of heavy metals by renewable polysaccharides. *Polymers*. 2023, vol. 15, article 4457. DOI: 10.3390/polym15224457.

9. Richards S., Dawson J., Stutter M. The potential use of natural vs commercial biosorbent material to remediate stream waters by removing heavy metal contaminants. *Journal of Environmental Management*. 2019, vol. 231, pp. 275 – 281. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.019.

10. De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment. A review. *Sustainable Materials and Technologies*. 2016, vol. 9, pp. 10 – 40. DOI: 10.1016/j.susmat.2016.06.002.

11. Koptsik G. N. Modern approaches to remediation of soils contaminated with heavy metals (literature review). *Eurasian Soil Science*. 2014, no. 7, pp. 851 – 868. [In Russ].

12. Slukovskaya M. V., Ivanova L. A., Gorbacheva T. T., Drogobuzhskaya S. V., Inozemtseva E. S., Markovskaya E. F. Changes in the properties of technogenically polluted soil when using carbonatite meliorant in the impact zone of a copper-nickel combine. *Transactions of the Karelian research centre of the Russian academy of sciences*. 2013, no. 6, pp. 133 – 141. [In Russ].

13. Elboughdiri N. The use of natural zeolite to remove heavy metals Cu (II), Pb (II) and Cd (II), from industrial wastewater. *Journal Cogent Engineering*. 2020, vol. 7, no. 1. DOI: 10.1080/23311916.2020.1782623.

14. Weng C.-H., Sharma Y. C., Chu S.-H. Adsorption of Cr(VI) from aqueous solutions by spent activated clay. *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 155, no. 1-2, pp. 65 – 75. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.029.

15. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Navolokina V. Yu. Assessment of the impact of the flooded Levikhinsky copper-chipped mine on the quality of surface waters of the Tagil river. *Problems of Subsoil Use*. 2019, no. 3(22), pp. 155 – 161. [In Russ].

16. Elokhina S. N. *Tekhnogenez zatoplennykh rudnikov Urala* [Technogenesis of flooded mines in the Urals], Doctor's thesis, Ekaterinburg, UGGU, 2014, 43 p.

17. Belozertseva I. A., Granina N. I. The impact of exploration, extraction and processing of minerals on the soils of Siberia. *The Fundamental researches*. 2015, no. 10-2, pp. 238 – 242. [In Russ].

18. Rybnikova L. S., Navolokina V. Yu. Justification of measures to minimize the impact of acidic mine waters on the hydrosphere. A case-study of Levikha Copper-Sulphide Mine, Sverdlovsk Region. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-2, pp. 245 – 256. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_245.

19. Yanin E. P. Environmental consequences of the development of deposits of non-ferrous and rare metals. Analytical review. *Ekologicheskaya ekspertiza*. 2020, no. 1, pp. 2 – 82. [In Russ]. DOI: 10.36535/0869-1010-2020-01-1.

20. Kislitsyna A. P., Figurin V. A. The effect of lime and mineral fertilizers on agrochemical characteristics of soil and productivity of birdsfoot trefoil and timothy grass mixture. *Agricultural science of Euro-North-East*. 2021, no. 3, pp. 367 – 375. [In Russ]. DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.3.367-375.

21. Abuova G. B., Davydova E. V. General characteristics of sorbents used to improve the operation of wastewater treatment plants. *Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa*. 2015, no. 1, pp. 362 – 366. [In Russ].

22. Lodygin E. D., Alekseev I. I., Vasilevich R. S., Abakumov E. V. Complexation of lead and cadmium ions with humic acids from arctic peat soils. *Environmental Research*. 2020, vol. 191, article 110058. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110058.

23. Kuznetsova I. A., Larionov N. S. The chemical composition and sorption properties of peat are the basis of the resource potential of typical upland bogs of the north-west of Russia. *Advances in current natural sciences*. 2018, no. 7, pp. 165 – 170. [In Russ]. DOI: 10.17513/use.36820.

24. Gavrilov S. V., Kanarskaya Z. A. Adsorption properties of peat and products based on it. *Herald of technological university*. 2015, no. 2, pp. 422 – 427. [In Russ].

25. 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, no. 5, pp. 131 – 141. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_131.

26. 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.

27. Nguyen Viet Cong, Korotkova P. S., Khanmamedova E. N., Grigoryeva L. S. Modified sorbents based on diatomites. *Vestnik MGSU*. 2019, vol. 14 (7), pp. 862 – 869. [In Russ]. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.862-869.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Апакашев Рафаил Абдрахманович*¹ — д-р хим. наук,
профессор, e-mail: Apakashev.R@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9006-3667,
*Малышев Александр Николаевич*¹ — инженер-исследователь,
e-mail: malyshev.k1b@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-3104-1687,
*Лебзин Максим Сергеевич*¹ — младший
научный сотрудник, e-mail: az_ma@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5959-135X,
*Курмачева Вера Сергеевна*¹ — лаборант-исследователь,
e-mail: verakurmacheva55@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0005-5925-021X,
*Гордеева Юлия Фидаисовна*¹ — зав. лабораторией,
e-mail: julia100990@inbox.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7184-6586,
¹ Уральский государственный горный университет.
Для контактов: Малышев А.Н., e-mail: malyshev.k1b@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*R.A. Apakashev*¹, Dr. Sci. (Chem.), Professor,
e-mail: Apakashev.R@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9006-3667,
*A.N. Malyshev*¹, Research Engineer,
e-mail: malyshev.k1b@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-3104-1687,
*M.S. Lebzin*¹, Junior Researcher,
e-mail: az_ma@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5959-135X,
*V.S. Kurmacheva*¹, Laboratory Assistant-Researcher,
e-mail: verakurmacheva55@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0005-5925-021X
*Yu.F. Gordeeva*¹, Head of Laboratory,
e-mail: julia100990@inbox.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7184-6586,
¹ Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.
Corresponding author: A.N. Malyshev, e-mail: malyshev.k1b@gmail.com.

Получена редакцией 16.07.2024, получена после рецензии 02.11.2024, принята к печати 10.11.2024.
Received by the editors 16.07.2024, received after the review 02.11.2024, accepted for printing 10.11.2024.

