



Научная статья

## Обоснование возможности применения отходов производства гуминовых препаратов для очистки сточных вод от металлов ( $\text{Cd}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ ) с целью разработки эффективных мероприятий по экологической реабилитации

Н.Ю.Антонинова✉, А.В.Собенин, А.И.Усманов, А.А.Горбунов

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**Как цитировать эту статью:** Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Усманов А.И., Горбунов А.А. Обоснование возможности применения отходов производства гуминовых препаратов для очистки сточных вод от металлов ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ) с целью разработки эффективных мероприятий по экологической реабилитации // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 421-432. EDN NYTVJH

**Аннотация.** Представлены результаты исследования оптимальных условий и параметров для доочистки подотвальных вод от ионов металлов с использованием отходов производства гуминовых кислот в целях разработки эффективных мероприятий по экологической реабилитации экосистем, нарушенных при отработке медноколчеданных месторождений. Проанализировано влияние времени контакта и дозировки отходов на процесс очистки, изучены изменения pH сточной воды и ее воздействие на рост и развитие растений. Выявлены ключевые факторы, позволяющие достичь эффективности процесса очистки – оптимальное время контакта в диапазоне от 120 до 180 мин и дозировка отходов 10 г/л. Исследование показало, что использование отходов позволило получить нейтральное значение pH, равное 7,03, по сравнению с изначальным значением 5,95. Установлено, что использование отходов железо-магниевого производства в сочетании с отходами производства гуминовых препаратов позволяют достичь ПДК рыбохозяйственного значения (за исключением магния). Сточные воды после процесса доочистки, содержащие значительные концентрации магния, не оказывали стимулирующего воздействия на рост и развитие растений *Lepidium sativum* L. По результатам биотестирования можно также констатировать отсутствие негативного воздействия на рост и развитие *Lepidium sativum* L. Полученные результаты указывают на потенциальную возможность использования доочищенных сточных вод для полива растений в процессе инициирования экологической реабилитации нарушенных экосистем.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы; сточные воды; удаление ионов из раствора; отходы; экологическая реабилитация; биотестирование

**Благодарность.** Статья подготовлена в рамках госзадания № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022-2024). Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании (FUWE-2022-0002), № 1021062010532-7-1.5.1.

Поступила: 31.01.2024

Принята: 03.06.2024

Онлайн: 04.07.2024

Опубликована: 04.07.2024

**Введение.** Разработка месторождений твердых полезных ископаемых в Уральском регионе, наличие бесхозных либо законсервированных горнопромышленных объектов, а также объектов накопленного экологического вреда определяют сложную экологическую обстановку в регионе, поэтому и прогрессирующая деградация природной среды остается серьезной проблемой в настоящее время несмотря на то, что экологический фактор постепенно становится одним из основополагающих при выборе решений [1, 2].

Согласно данным государственного доклада о состоянии и охране окружающей среды Свердловской обл.<sup>1</sup> основным источником образования отходов в 2022 г. стала добывающая промышленность. Удельный вес отходов добычи полезных ископаемых в образовании, утилизации и наличии на конец года составил 90,1; 87,4 и 93,2 % от всех образованных, утилизированных и накопленных отходов

<sup>1</sup> О состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2022 году. Государственный доклад. Екатеринбург: Министерство природных ресурсов и экологии Свердловской области, 2023. 366 с.



производства и потребления по Свердловской обл. Образование отходов данной группы по сравнению с 2021 г. увеличилось на 8,147 млн т (5,24 %) и составило 163,6 млн т, в основном за счет увеличения объема вскрышных пород. Справедливо будет отметить, что и доля утилизированных отходов также возросла. Количество утилизированных отходов добычи полезных ископаемых по сравнению с 2021 г. увеличено на 2,01 млн т (3,1 %) и составило 67,5 млн т (41,2 % от образования данной группы отходов) за счет использования скальных вскрышных пород на собственные нужды.

Несмотря на положительную динамику, наличие крупнотоннажных отходов минерально-сырьевого комплекса как действующих, так и законсервированных производств, является одной из причин развития негативных процессов в окружающей среде [3, 4]. В 2022 г. к классу «загрязненных» на территории Свердловской обл. относилась вода водных объектов в 26 % створов пунктов наблюдений, к классу «грязных» – в 57 %, к классу «очень грязных» – в 13 %, к классу «экстремально грязных» – в 4 % створов. Основными ингредиентами из перечня случаев экстремально высоких уровней загрязнения поверхностных вод в створах государственной наблюдательной сети на территории Свердловской обл. за 2022 г. являются цинк, медь, марганец. По качеству подземных вод можно отметить случаи превышения ПДК по кадмию и свинцу.

Актуальность решения экологических проблем нарушенных территорий очевидна в связи с накоплением огромного количества отходов горного и металлургического производств, заскладированных в шламо- и хвостохранилища, отвалы вскрышных пород, шлаков и некондиционного сырья [5-7]. Поэтому и вопросы выявления закономерностей воздействия горнодобывающих предприятий на депонирующие среды в аспекте изучения процессов, определяющих накопление и миграцию загрязняющих веществ, применение мелиоративных приемов для детоксикации почв, разработку мероприятий по экологической реабилитации водных объектов с помощью растений и сорбционных материалов, созданных на основе природного и техногенного сырья, представляют собой интенсивно развивающуюся область исследований [8-10]. Большой объем публикаций иллюстрирует широкий спектр применяемых материалов для удаления металлов из раствора сточных вод, включая красный шлам [11-13], золу [14-16], сталеплавильные шлаки [17], биочар [18-20], вермикулит [21] и различные отходы растительного происхождения [22-24]. Среди них все больше внимания привлекают отходы производств, поскольку ожидается, что использование отходов в природоохранных целях будет малозатратным [25].

Проведенные ранее эксперименты [8] подтвердили возможность использования отходов железо-магниевого производства в целях нейтрализации промышленных сточных вод от ионов металлов ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ). Экспериментально установлена зависимость эффективности очистки от дозы внесения отходов, времени контакта, начальной концентрации металлов и кислотно-щелочного баланса. Оптимальными условиями являются время контакта 120-180 мин, дозировка 4-10 г/л и первоначальная концентрация ионов металлов не более 500 мг/л.

Цель работы – оценка возможности использования отходов, образующихся при производстве гуминовых препаратов в качестве материала для доочистки сточных вод до уровня ПДК рыбохозяйственного значения от ионов металлов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) в концентрациях, полученных в результате экспериментальных исследований по перераспределению тяжелых металлов в системе «сточные воды – отходы» с использованием отходов железо-магниевого производства [8]. Кроме того, поставлена задача оценить влияние уже очищенных вод на рост и развитие биологических растительных ресурсов сельскохозяйственного назначения.

Выполнен анализ начальной концентрации металлов в растворе, pH растворов. Определены оптимальное время контакта и дозировка материалов. Проведена оценка влияния воды после доочистки на рост особей кресс-салата *Lepidium sativum* L.

**Материалы и методы.** Отходы, использованные в настоящем исследовании, получены при производстве гуминовых препаратов (ОГП). В качестве исходного сырья для производства гуминового препарата (гумата калия) используется соотношение компонентов по массе сухого вещества, %: верховой торф – 40-60; сапропель (ТУ 0135-001-94744244-2007) – 25-38; диатомит (ТУ 5761-001-59266087-2005) – 14-20; КОН – остальное. Основные неорганические соединения торфа –

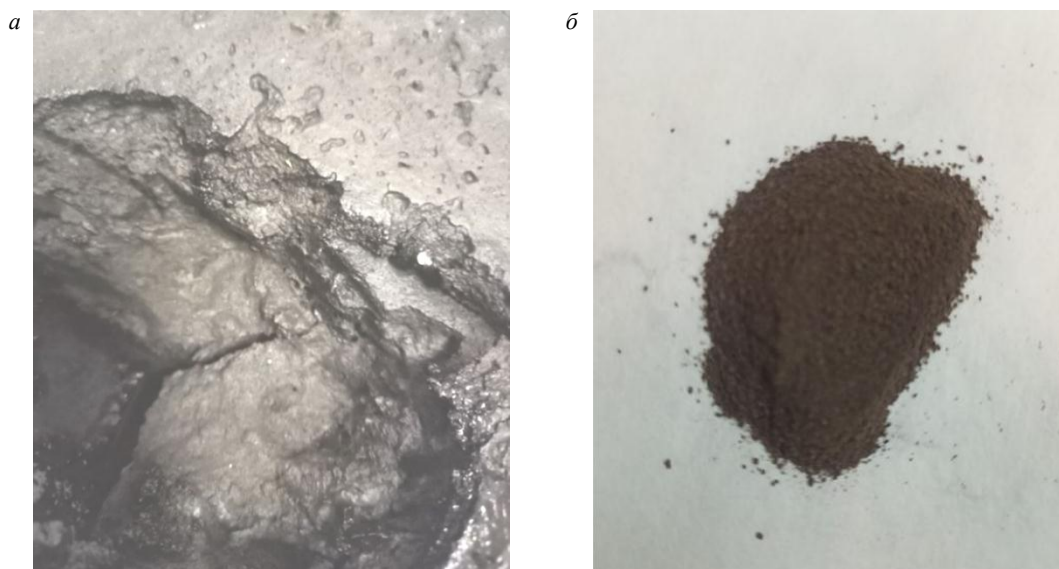


Рис.1. Отходы производства гуминовых кислот: а – до обработки; б – после обработки

азот до 1,5 %, фосфор, калий, кальций (в сумме) до 0,6 % (N:P:K). Содержание гуминовых веществ в торфе составляет 7,4-7,9 %. Диатомит более чем на 80 % состоит из кремнезема.

ОГП представляет собой пастообразное вещество темного серого цвета, которое образуется в результате процесса отделения твердой фазы от целевого продукта при помощи центрифугирования (рис.1).

Отходы были высушены при температуре 95 °С и измельчены до фракции 1 мм. Для сушки образцов использовали сушильный шкаф (ШС-80-01-СПУ, ООО «ПриборУфа», Россия), а для измельчения лабораторные сита и фарфоровую ступку с пестиком. Насыпная плотность ОГП – 400-450 кг/м<sup>3</sup>, влажность – 3-5 %, pH – 8,0-8,5.

*Сточные воды* – подотвальные воды отработанного медноколчеданного месторождения Кабан-1, находящегося в границах Свердловской обл. в 190 км от Екатеринбурга. Исследовались сточные воды после процесса взаимодействия с отходами железо-магниевого производства по методике [8], pH = 5,95. Элементный состав, мг/л: Cd<sup>2+</sup> – 0,01 (ПДК – 0,005); Zn<sup>2+</sup> – 0,2 (ПДК – 0,01); Mg<sup>2+</sup> – 849,60 (ПДК – 40); Cu<sup>2+</sup> – 0,1 (ПДК – 0,001) [8]. ПДК приняты по Приказу Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 10.03.2020) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

*Элементный анализ и пробоподготовка.* Для озоления образцов использовалась микроволновая система MARS 5 Digestion Microwave System от компании CEM Corporation (США) в соответствии с методикой EPA 3052<sup>2</sup>. Процесс начинался с добавления 0,5 г образца, к которому приливали 9 мл HNO<sub>3</sub> (ГОСТ 11125-84, 70 %) и 3 мл HF (ГОСТ 10484-78, 45 %). Затем смесь перемешивалась, после чего ее оставляли на 15 мин и закрывали сосуды. Применялись специальные сосуды, рекомендованные производителем – EasyPrep. Время, необходимое для нагрева до 180 °С, составляло 6 мин, время поддержания температуры – 10 мин, мощность – 1800 Вт. После обработки при разбавлении до 50 мл получали прозрачный образец без цвета и посторонних частиц. Для определения подвижных форм металлов использовали 1М HNO<sub>3</sub>.

При определении концентраций металлов в сточных водах, минерализованных пробах и фильтратах применяли метод атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) в воздушно-ацетиленовом пламени (Varian AA 240 FS от компании Varian Australia Pty Ltd. Австралия). Использовались определенные длины волн для различных элементов: Cd – 228,8; Zn – 213,9; Mg – 202,6;

<sup>2</sup> MARS 6. Microwave Acid Digestion. Method Note Compendium. CEM, 2018. 320 p.



Cu – 324,7 нм. Пределы обнаружения элементов в растворе составили: Cd – 1,5; Zn – 1,6; Cu – 1,2; Mg – 0,3 мкг/л.

**Эксперименты.** *Перераспределение металлов в системе «сточные воды – ОГП».* Изучалось влияние дозировки ОГП на степень удаления ионов металлов из раствора. В ходе проведения опытов навески образцов массой 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 г были взвешены и помещены в конические пробирки типа «фалькон». К образцам наливали сточные воды в объеме 50 мл. Далее проводилось перемешивание проб (с частотой 99 об/мин) в течение 120 мин при помощи ротационного смесителя ELMi RM-1L производства ELMi LTD (Латвия). Затем полученные растворы проходили процедуру фильтрации с использованием фильтров «синяя лента».

*Определение оптимального времени контакта для удаления ионов металлов из раствора.* К навескам массой 0,2 г наливали сточные воды в объеме 50 мл. Проводили перемешивание образцов в течение различных временных интервалов от 5 до 180 мин. Полученные растворы проходили процедуру фильтрации с использованием фильтров «синяя лента».

Для оценки влияния начальной концентрации ионов металлов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  на процесс очистки сточных вод были подготовлены растворы с различными концентрациями: 5, 10, 50, 100, 300, 500 и 1000 мг/л. Растворы были приготовлены с использованием квалифицированных реактивов «о.с.ч.» и государственных стандартных образцов (с концентрацией от 1 до 10 г/л). Эксперимент проводился при контакте 120 мин, применялась навеска образцов массой 0,2 г, объем раствора 50 мл, температура комнатная. В эксперименте определены статическая обменная емкость отходов (СОЕ) и степень извлечения загрязнителя из раствора ( $E$ ), произведен расчет стандартной ошибки среднего значения.

Определение статической обменной емкости и степени извлечения загрязнителя из раствора:

$$qe = (C_i - C_e)V / m; \quad (1)$$

$$E = (C_i - C_e) / C_i \cdot 100, \quad (2)$$

где  $C_i$  – исходная концентрация ионов в растворе, мг/л;  $C_e$  – равновесная (остаточная) концентрация ионов меди в фильтрате, устанавливающаяся в воде после перемешивания воды и субстрата, мг/л;  $V$  – объем приливаемого к отходам модельного раствора, л;  $m$  – масса сухой навески субстрата, г.

*Биотестирование сточных вод.* Эксперимент по проращиванию семян был проведен согласно методике в СанПин 2.1.7.573-96. Семена кресс-салата *Lepidium sativum* L. (30 шт.) укладывали равномерно на фильтровальную бумагу в чашку Петри. Далее в каждую чашку наливали по 5 мл сточных вод, полученных после взаимодействия с отходами. В качестве контроля – сточная вода месторождения Кабан-1 с исходным элементным составом (концентрации до очистки с использованием отходов железо-магниевого производства:  $\text{Cd}^{2+}$  – 0,20 (ПДК = 0,005);  $\text{Zn}^{2+}$  – 50,12 (ПДК – 0,01);  $\text{Mg}^{2+}$  – 322,50 (ПДК – 40);  $\text{Cu}^{2+}$  – 78,10 (ПДК – 0,001);  $\text{Fe}^{3+}$  – 147,71 (ПДК – 0,1);  $\text{Co}^{2+}$  – 1,73 (ПДК – 0,01);  $\text{Ca}^{2+}$  – 33,20 (ПДК – 180);  $\text{K}^{+}$  – 5,26 (ПДК – 50) и дистиллированную воду [8]. Чашки закрывали крышкой и оставляли на 72 ч при комнатной температуре. Эксперимент повторяли три раза. По окончании эксперимента измеряли длину корней и всхожесть семян, а также содержание исследуемых химических элементов в особях. Перед проведением химического анализа семена промывались дистиллированной водой. Семена считались проросшими, если их длина составляла не менее 2 мм. На основании этих данных были получены показатели относительной всхожести семян (RGP) и относительного роста корней (RRG):

$$Gs / Gc \cdot 100 = \text{RGP}, \quad (3)$$

где  $G_s$  – количество пророщенных семян в образце; а  $G_c$  – количество пророщенных семян в контроле (дистиллированная вода);

$$L_s / L_c \cdot 100 = \text{RRG}, \quad (4)$$

$L_s$  – длина корешка пророщенных семян в образце;  $L_c$  – длина корешка пророщенного семени в контроле (дистиллированная вода).





**Обсуждение результатов.** Для подтверждения возможности применения ОГП в качестве материала для доочистки сточных вод от ионов металлов изучено влияние начальной концентрации металлов в растворе, время контакта между материалом и раствором, дозировка ОГП и кислотно-основное состояние водной среды (pH). Анализ степени влияния каждого из этих факторов помогает доказать эффективность и потенциал ОГП для очистки сточных вод от металлов [26-28]. Полученные результаты могут послужить основой для обоснования использования отходов производства в качестве материала для очистки и доочистки промышленных сточных вод в части разработки эффективных мероприятий по экологической реабилитации водных объектов.

*Влияние начальной концентрации ионов металлов на очистку сточных вод.* Начальная концентрация ионов металлов контролирует удаление ионов металлов из водного раствора. Это позволяет оценить влияние концентрации металлов в растворе на процессы взаимодействия и понять, какие концентрации имеют наибольшее значение для эффективного удаления из растворов [29]. Зависимость статической обменной емкости ОГП по отношению к исследуемым металлам ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) относительно их начальной концентрации в монорастворе показана на рис.2. Для разведения растворов от 5 до 1000 мг/л использовали государственные стандартные образцы.

График на рис.2 показывает, что процессы удаления металлов, таких как медь, кадмий, магний и цинк, обладают определенной динамикой. Первоначальная стадия (от 5 до 50 мг/л) характеризуется быстрым извлечением металлов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ), что свидетельствует о высокой скорости образования соединений металлов с отходами [30, 31]. После этой стадии наступает период (50-200 мг/л) резкого снижения для  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ . В итоге (от 500 мг/л) происходит установление равновесия, когда скорость поглощения металлов и их удаления становится примерно одинаковой, что сигнализирует о завершении данного процесса и достижении определенной стабильности системы. Процесс поглощения магния и кадмия ОГП увеличивается с возрастанием исходной концентрации данных элементов в растворе, что показано на рис.2 в виде вогнутой кривой.

Таким образом, можно констатировать невозможность применения ОГП для очистки сточных вод, содержащих высокие концентрации исследуемых элементов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  более 50 мг/л), однако их можно использовать на завершающих стадиях в целях доведения качества очищаемых вод до уровня ПДК рыбохозяйственного значения.

Механизм удаления элементов из сточных вод возможно описать в несколько этапов. На первом этапе ионы металлов перемещаются из раствора на внешнюю поверхность отхода. Этот процесс соответствует пленочной диффузии, когда ионы металлов перемещаются с поверхности раствора на поверхность отхода. На втором этапе ионы металлов проникают внутрь структуры отхода. Этот процесс предполагает перемещение ионов металлов через внутренние каналы или поры материала, что может привести к их более глубокой фиксации внутри материала [32, 33]. Все это играет ключевую роль в понимании процессов удаления металлов, а также для разработки эффективных технологий очистки воды в аспекте внедрения мероприятий по экологической реабилитации водных объектов, в том числе за счет исключения сброса в них высокоминерализованных вод.

*Влияние времени контакта и дозировки.* Исследование процесса извлечения ионов из раствора включало в себя изменение массы отходов от 0,1 до 2 г в 50 мл раствора с постоянной концентрацией. Этот процесс проводился при постоянной скорости перемешивания 99 об/мин и длился 120 мин при комнатной температуре. Для оценки извлечения ионов металлов из сточных вод в качестве модельного раствора использовали обработанные с помощью отходов железо-магниевого производства подотвальные воды месторождения Кабан-1 [8]. Результаты приведены в табл.1 и на рис.3.

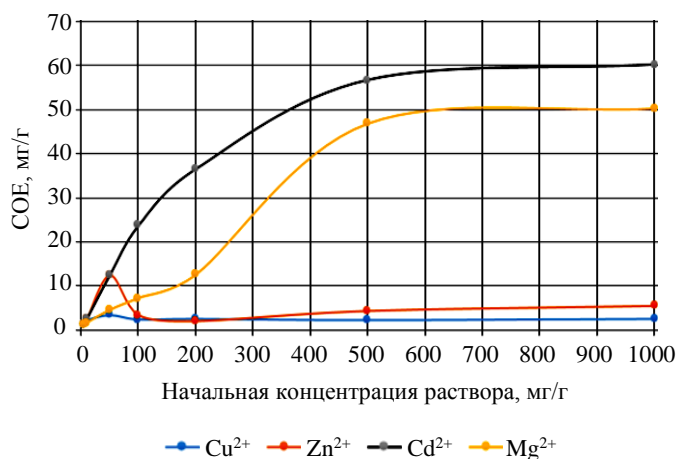


Рис.2. Влияние начальной концентрации ионов металлов в растворе на процесс очистки сточных вод ОГП (монометаллические растворы)



Таблица 1

Результаты химического анализа полученных фильтратов (50 мл сточных вод, время контакта 120 мин)

Навеска, г	Содержание химических элементов в фильтрате, мг/л				pH
	Cd <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	
0,1	0,007±0,001	0,15±0,02	953,14±55,16	0,073±0,01	6,25±0,01
0,2	0,003±0,001	0,1±0,02	857,11±47,21	0,039±0,01	6,78±0,01
0,5	< 0,0015	< 0,0016	931,10±45,24	< 0,0012	7,03±0,01
1,0	< 0,0015	< 0,0016	932,05±43,42	< 0,0012	6,99±0,01
1,5	< 0,0015	< 0,0016	946,41±40,56	< 0,0012	6,9±0,01
2,0	< 0,0015	< 0,0016	992,94±44,15	< 0,0012	6,78±0,01

Результаты исследования показали, что эффективность удаления указанных металлов с использованием ОГП возрастала по мере увеличения его дозировки, пока не была достигнута практически полная очистка (100 %). Это свидетельствует о том, что более высокая дозировка ОГП способствовала увеличению количества активных участков для связывания металлов, что, в свою очередь, повышало общую эффективность процесса удаления [34-36]. Далее способность ОГП удалять медь, кадмий и цинк из раствора не изменяется при увеличении дозировки. Принимая во внимание наличие в исходном сырье для производства гумата калия (диатомите) кремнезема, получаем в результате взаимодействия ОГП со сточными водами образование практически нерастворимых соединений.

На следующем этапе исследования установлено влияние продолжительности контакта между ОГП и сточными водами на эффективность удаления ионов металлов, что позволяет определить оптимальное время воздействия ОГП для очистки сточных вод от исследуемых элементов до уровня ПДК.

Таблица 2

Результаты химического анализа полученных фильтратов (50 мл сточных вод, навеска 0,2 г)

Время контакта, мин	Содержание химических элементов в фильтрате, мг/л				pH
	Cd <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	
5	0,009±0,001	0,18±0,03	995,45±52,14	0,08±0,02	6,05±0,01
10	0,007±0,001	0,17±0,02	994,51±54,21	0,07±0,02	6,11±0,01
15	0,006±0,001	0,15±0,02	854,25±56,12	0,05±0,02	6,25±0,01
30	0,005±0,001	0,12±0,02	966,32±50,11	0,05±0,02	6,52±0,01
60	0,005±0,001	0,11±0,01	854,55±56,87	0,04±0,01	6,70±0,01
120	0,003±0,001	0,10±0,02	857,11±47,21	0,03±0,01	6,78±0,01
180	0,003±0,001	0,10±0,02	905,84±67,14	0,04±0,01	6,82±0,01

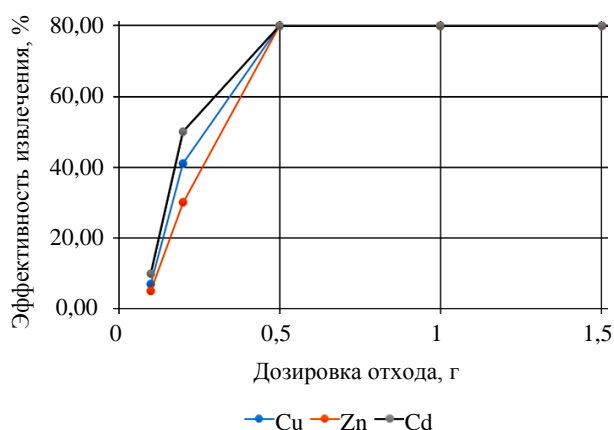


Рис.3. Влияние дозировки отходов на степень извлечения ионов металлов из раствора

Экспериментальное исследование воздействия времени контакта на процесс доочистки сточных вод проведено при постоянной концентрации раствора (табл.2) в пределах различных временных интервалов от 5 до 180 мин при комнатной температуре (рис.4).

Элементный состав фильтратов, полученный в результате взаимодействия ОГП со сточными водами, позволяет оценить изменения в концентрации различных элементов в фильтратах в зависимости от времени контакта, что важно для понимания динамики процесса и определения оптимальных условий для очистки сточных вод до уровня ПДК (табл.2). Остаточная концентрация металлов в фильтратах после



взаимодействия при данных условиях времени контакта варьировала от 0,009 до 0,003 мг/л для кадмия, от 0,18 до 0,10 мг/л для цинка, от 995,45 до 854,55 мг/л для магния и от 0,08 до 0,04 мг/л для меди.

Можно сделать вывод, что в промежутке времени от 120 до 180 мин фиксируются максимальные значения показателя эффективности по меди, кадмию и цинку, дальнейшее увеличение времени взаимодействия растворов с ОГП не приведет к значимым изменениям исследуемого показателя. Важно отметить, что значения магния в полученных фильтрах оказались выше, чем исходные значения магния в сточной воде. Это указывает на то, что процесс удаления ионов магния из сточных полиметаллических вод не является настолько эффективным, как в искусственно созданных модельных растворах из ГСО, что свидетельствует о необходимости проведения дальнейших исследований, в части формирования каскада биологических прудов с учетом вещественного состава ложа и фильтрационной дамбы, чувствительных к данному химическому элементу.

Далее для оценки риска вторичного загрязнения при использовании ОГП выполнен химический анализ образцов, полученных после взаимодействия со сточными водами. Приведены концентрации металлов в материале до начала эксперимента (табл.3).

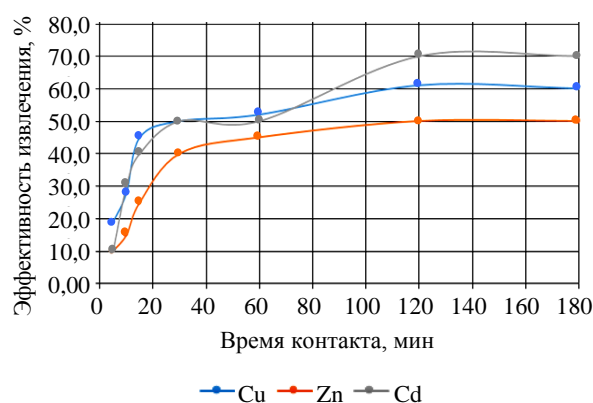


Рис.4. Влияние времени контакта на степень извлечения ионов металлов из раствора

Таблица 3

Результаты химического анализа ОГП после процесса взаимодействия со сточными водами

Элемент	Валовые формы, мг/кг (до взаимодействия)	Валовые формы, мг/кг (после взаимодействия)	Подвижные, мг/кг (после взаимодействия)	ПДК, мг/кг* (валовая/подвижная формы)
Cu	0,81±0,10	9,68±1,58	1,53±0,25	33/3
Zn	4,38±0,98	21,75±4,58	4,25±0,89	55/23
Cd	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	0,5/Не установлена
Co	0,20±0,05	4,35±1,25	0,98±0,10	-/5,0
Mg	1504,31±354,44	1305,40±299,45	602,93±154,45	Не установлена
Mn	21,27±3,47	22,03±3,33	4,03±0,78	1500/700
K	36540,38±3548,21	3628,68±454,68	1245,39±248,45	Не установлена
Fe	2485,93±384,49	2490,38±335,24	1300,58±224,87	Не установлена

\* СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Изначально ОГП содержит большое количество магния — 1504,31 мг/кг; калия — 36540,38 мг/кг; марганца — 21,27 мг/кг и железа — 2485,93 мг/кг. В конце эксперимента фиксируется уменьшение валовых форм магния до 1305,40 мг/кг, калия до 3628,68 мг/кг, железо и марганец остались в тех же значениях. При этом отмечается значительное накопление меди с 0,81 до 9,68 мг/кг; цинка — с 4,38 до 21,75 мг/кг, кобальта — с 0,20 до 4,35 мг/кг.

Проведенные эксперименты по доочистке предварительно обработанных сточных подотваль-ных вод месторождения Кабан-1 при определении оптимальных условий и временных параметров для процессов очистки указывают на диапазон, в течение которого процесс достигает наивысшей эффективности — от 120 до 180 мин, при дозировке материала 10 г/л (навеска 0,5 г).

**Биотестирование сточных вод.** Несмотря на существенное превышение ПДК рыбохозяй-ственного значения по магнию, в рамках данного исследования для оперативного контроля острой токсичности проб была применена методика биотестирования, включающая использование кресс-салата в качестве тест-объекта. Этот метод основан на изучении поведенческой реакции растений в ответ на воздействие сточных вод. Реакция растений (скорость прорастания семян, развитие

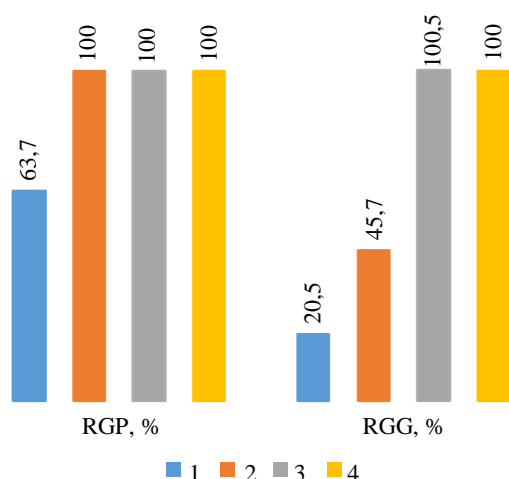


Рис.5. Влияние различных составов сточных вод (1-4 в табл.4) на показатели всхожести (RGP) и роста корней (RGG) кресс-салата *Lepidium sativum* L.

корневой системы и общая биомасса) может служить показателем негативного воздействия различных загрязнителей на экосистему.

Одним из главных преимуществ использования кресс-салата в качестве тест-объекта являются относительно короткие сроки проведения опытов благодаря быстрому циклу роста и развития растений [37, 38].

Семена растений *Lepidium sativum* L. были пророщены в чашках Петри (рис.5) на фильтровальной бумаге в течение 72 ч с добавлением исследуемых водных растворов: 1) сточная вода месторождения Кабан-1 (необработанная); 2) сточная вода месторождения Кабан-1 (после взаимодействия с отходом железо-магниевого производства) [8]; 3) сточная вода месторождения Кабан-1 (после взаимодействия с отходом железо-магниевого производства и ОГП); 4) дистиллированная вода.

Таблица 4

Влияние различных составов сточных вод на всхожесть и рост кресс-салата, элементный анализ особей после процесса взаимодействия

Элемент	Сточная вода необработанная	Сточная вода после взаимодействия с отходом железо-магниевого производства. Дозировка отходов – 10 г/л, время контакта – 120 мин	Сточная вода после взаимодействия с отходом железо-магниевого производства и ОГП. Дозировка отходов – 10 г/л, время контакта – 120 мин	Дистиллированная вода
	1	2	3	4
Количество проросших семян, шт.	19,00±2,00	30,00±0,00	30,00±0,00	30,00±0,00
Длина корня, мм	4,30±4,00	9,64±2,65	21,11±6,00	21,06±1,53
Общая биомасса, мг	15,00±2,89	27,15±4,04	40,09±4,36	45,66±1,15
RGP, % (процент прорастания)	63,33±2,00	100,00±0,00	100,00±0,00	100,00±0,00
RGG, % (относительная длина корней)	20,50±4,00	45,74±2,65	100,50±6,00	100,00±1,53
Cu, мг/кг	662,67±30,00	16,80±1,33	8,75±1,02	8,40±1,11
Zn, мг/кг	1478,40±218,04	174,32±6,56	53,10±3,11	45,12±1,85
Cd, мг/кг	1,87±0,46	1,00±0,27	< 0,0015	< 0,0015
Fe, мг/кг	1442,47±117,90	234,80±33,50	206,15±25,51	246,40±29,42
Mg, мг/кг	2042,13±211,00	15064,00±667,18	11956,00±468,01	1996,00±127,42
K, мг/кг	< 0,0008	13108,00±452,28	15419,50±709,10	13704,00±394,22
pH	2,33	5,95	7,05	6,51

Проведенные экспериментальные исследования выявили, что у семян *Lepidium sativum* L., подвергшихся воздействию необработанной сточной воды месторождения Кабан-1, наблюдалось существенное снижение прорастания семян, общей биомассы и развития корневой системы по сравнению с контрольными значениями (табл.4, рис.5).

Обнаружено, что прорастание семян снизилось более чем на 30 %, а общая биомасса на 65 %, что свидетельствует об ухудшении жизнеспособности семян под воздействием указанной сточной воды. Развитие корневой системы растений оказалось на 80 % меньше по сравнению с контрольными значениями. Эти данные указывают на негативное воздействие сточной воды на развитие растений, что является серьезным сигналом ее потенциальной токсичности и воздействия на живые системы.

Исследование показало, что составы 2 и 3, включающие сточную воду, взятую после взаимодействия с отходами, демонстрировали высокую эффективность по сравнению с составом 1,





содержащим необработанную сточную воду. Количество проросших семян в этих растворах было аналогичным контрольному образцу и составил 100 %.

У растений, проросших в составе 2 (с содержанием отходов железо-магниевого производства 10 г/л), относительная длина корневой системы составила 45,74 %, что в 2,2 раза больше, чем у растений из состава 1. Однако эта длина корней была в 2,1 раза меньше, чем у растений из состава 3, включавшего воду, подготовленную сначала с использованием отходов железо-магниевого производства, а затем отходов производства гуминовых кислот.

При анализе элементного состава растений важно отметить снижение содержания всех исследуемых металлов в образцах 2 и 3 по сравнению с необработанной сточной водой, за исключением магния и калия. Это указывает на потенциальное влияние процесса обработки воды с использованием отходов на уменьшение концентрации различных металлов в растениях. Именно калий и магний играют важную роль в жизнедеятельности растений, особенно в условиях техногенно измененных или загрязненных экосистем. Эти элементы являются макроэлементами и необходимы для растений в относительно больших количествах по сравнению с микроэлементами [39, 40].

Калий играет ключевую роль в процессе фотосинтеза, активирует многие ферменты, участвует в регуляции водного баланса растений, а также влияет на устойчивость растений к стрессовым условиям, таким как засуха и заморозки. С другой стороны, магний не менее важен для растений, поскольку он играет важную роль в фотосинтезе и синтезе хлорофилла, участвует в метаболических процессах, в усвоении и транспорте фосфора, что важно для обеспечения роста и развития растений [39, 40].

В условиях техногенного влияния на окружающую среду, где растения могут сталкиваться с неблагоприятными условиями, наличие достаточного уровня калия и магния в почве и их доступности становится критически важным для обеспечения нормального роста и развития, и, следовательно, имеет важное значение для возобновления и поддержания баланса в таких экосистемах, хотя необходимо уточнить, что очищенные сточные воды и не оказывают какого-либо стимулирующего эффекта на растения *Lepidium sativum* L. [39, 40].

Также одним из наиболее важных и незаменимых микроэлементов для растений является железо. Нерастворимость солей железа и сложность их перехода в растворимую форму создают проблемы для усвоения ионов железа корнями растений. Железо является важным элементом для множества реакций и процессов в растениях, но его недостаток или избыток может негативно сказываться на их развитии и продуктивности [41]. В образцах сточных вод месторождения Кабан-1 (составы 1 и 2) концентрация железа значительно выше, чем в других образцах, включая составы, обработанные отходами.

Особенно важно, что в составе 3 не обнаружен кадмий, что указывает на возможное снижение доступности кадмия для растений при использовании процесса обработки, который включает отходы железо-магниевого производства и ОГП.

В исследовании химического состава проросших семян кресс-салата было обнаружено, что растения, подвергшиеся воздействию необработанных сточных вод, поглотили больше микроэлементов, таких как железо, цинк, медь и кадмий по сравнению с другими образцами. Так как большинство растений имеют корневой тип аккумуляции металлов, процесс накопления вероятнее всего происходил в подземной части [42-44]. Обнаруженные высокие концентрации железа, цинка, меди и кадмия оказались токсичными для растений, что повлияло на показатели проросших семян, длину корней и общую биомассу.

Кроме того, в образцах 1 наблюдалось заболевание хлороз, связанное с недостатком хлорофилла, что привело к изменению окраски (пожелтению) растений. Низкий уровень pH (2,33) в образцах 1 также повлиял на усвояемость макроэлементов магния и калия, которые необходимы для здорового роста растений [45, 46]. Известно, что макроэлементы, включая азот, калий, кальций, магний и серу, лучше усваиваются при значениях pH от 6,0 до 6,5. Микроэлементы становятся менее доступными для растений при более высоких щелочных значениях pH, превышающих 7,0 [45, 46].

Микроэлементы калий и магний, являясь антагонистами, конкурируют между собой в процессах усвоения питательных элементов в растениях [47]. В образцах с низким уровнем pH



растения недополучают необходимые макроэлементы, такие как калий и магний, однако накапливают избыток микроэлементов железа, цинка, кадмия и меди. Этот дисбаланс негативно влияет на рост и развитие растений.

Таким образом, поддержание оптимального уровня pH почвы является ключевым фактором для предотвращения хлороза и обеспечения здорового роста растений. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования очищенных с помощью комплекса отходов железо-магниевого производства и ОГП сточных вод для полива биологических растительных ресурсов при инициировании процессов экологической реабилитации экосистем, нарушенных в период отработки медноколчеданных месторождений.

**Заключение.** В настоящем исследовании были выявлены оптимальные условия для эффективного применения ОГП при проведении процессов доочистки предварительно очищенных подотвальных вод месторождения Кабан-1 от ионов меди, кадмия и цинка. Наиболее эффективные параметры включают следующее:

- Время контакта в диапазоне от 120 до 180 мин, что указывает на важность продолжительного воздействия для достижения максимальной эффективности процесса очистки. Длительное время контакта позволяет увеличить взаимодействие между отходами и сточными водами, что способствует более полному удалению ионов металлов из раствора.

- Дозировка отходов 10 г/л показывает оптимальное количество отходов для достижения желаемого эффекта очистки. Этот параметр влияет на степень взаимодействия между отходами и раствором, а также на общую эффективность процесса.

С помощью отходов было достигнуто нейтральное значение pH (7,03) по сравнению с исходным значением (5,95). Однако отходы оказались неэффективными для доочистки природных сточных вод от ионов магния, также отмечен процесс высвобождения  $Mg^{2+}$  в раствор. Очищенные сточные воды, несмотря на значительное количество магния, не оказывают негативного воздействия на рост и развитие растений *Lepidium sativum* L., но и стимулирующего воздействия также не отмечено.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.Б., Талалай А.Г., Гуман О.М., Хасанова Г.Г. Техногенные месторождения и особенности их воздействия на природную окружающую среду // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 3. С. 120-129. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-120-129
2. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Соломеин Ю.М. Экогеотехнология добычи бедных руд с созданием условий для попутной утилизации отходов горного производства // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 289-296. DOI: 10.31897/PMI.2023.21
3. Литвинова Т.Е., Сучков Д.В. Комплексный подход к утилизации техногенных отходов минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 331-348. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_331
4. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Проблемы самореабилитации гидросферы и очистки шахтных вод на постэксплуатационном этапе (на примере Левихинского рудника, Средний Урал) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3-1. С. 488-500. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-488-500
5. Маковозова З.Э., Соколов А.А., Фоменко В.А., Сарбаева М.Т. Влияние гидрогеологических особенностей Унальского хвостохранилища на загрязнение экосистемы тяжелыми металлами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 6. С. 126-138. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-6-0-126
6. Семячков А.И., Почечун В.А., Семячков К.А. Гидрогеоэкологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 168-179. DOI: 10.31897/PMI.2023.24
7. Мочалова Л.А., Соколова О.Г., Подкорытов В.Н., Еремеева О.С. Организация циркулярного промышленного кластера в условиях минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11-1. С. 374-387. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_374
8. Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Усманов А.И., Шепель К.В. Оценка возможности использования отходов железо-магниевого производства для очистки сточных вод от тяжелых металлов ( $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ) // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 257-265. DOI: 10.31897/PMI.2023.34
9. Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В. Развитие технологий и технических средств для снижения воздействия на окружающую среду в зоне влияния хвостохранилища // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. № 1. С. 25-41. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-25-41
10. Пашкевич М.А., Коротаева А.Э., Матвеева В.А. Экспериментальное моделирование системы болотных биогеоценозов для повышения эффективности очистки карьерных вод // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 785-794.
11. Xianshang Bai, Jianwei Lin, Zhibin Zhang, Yanhui Zhan. Immobilization of lead, copper, cadmium, nickel, and zinc in sediment by red mud: adsorption characteristics, mechanism, and effect of dosage on immobilization efficiency // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. Iss. 34. P. 51793-51814. DOI: 10.1007/s11356-022-19506-2



12. Ang Liu, Yingchen Bai, Chao Wang *et al.* Study on the removal of iron (II) and manganese (II) in acidic mine drainage by red mud: Performance and mechanism // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. Iss. 55. P. 117970-117980. DOI: [10.1007/s11356-023-30378-y](https://doi.org/10.1007/s11356-023-30378-y)
13. Фоменко А.И., Соколов Л.И. Применение зол тепловых электростанций для очистки сточных вод // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26. № 1. С. 14-18. DOI: [10.18412/1816-0395-2022-1-14-18](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-1-14-18)
14. Guifang Wang, Jie Xiang, Guangchuan Liang *et al.* Application of common industrial solid waste in water treatment: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. Iss. 52. P. 111766-111801. DOI: [10.1007/s11356-023-30142-2](https://doi.org/10.1007/s11356-023-30142-2)
15. Собенин А.В., Антонинова Н.Ю., Усманов А.И., Шепель К.В. Оценка влияния вещественного состава ложа биологических прудков на очистку сточных вод предприятий горнометаллургического комплекса // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 5-2. С. 273-282. DOI: [10.25018/0236-1493\\_2021\\_52\\_0\\_273](https://doi.org/10.25018/0236-1493_2021_52_0_273)
16. Теран А.И. Кинетика извлечения из водных растворов ионов  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Pb}^{2+}$  фильтрующими загрузкими, полученными на основе сталеплавильных шлаков // *Литье и металлургия*. 2019. № 4. С. 76-80. DOI: [10.21122/1683-6065-2019-4-76-80](https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-76-80)
17. Sizirici B., Fseha Y.H., Yildiz I. *et al.* The effect of pyrolysis temperature and feedstock on date palm waste derived biochar to remove single and multi-metals in aqueous solutions // *Sustainable Environment Research*. 2021. Vol. 31. № 9. DOI: [10.1186/s42834-021-00083-x](https://doi.org/10.1186/s42834-021-00083-x)
18. Runjuan Zhou, Ming Zhang, Shuai Shao. Optimization of target biochar for the adsorption of target heavy metal ion // *Scientific reports*. 2022. Vol. 12. № 13662. DOI: [10.1038/s41598-022-17901-w](https://doi.org/10.1038/s41598-022-17901-w)
19. Madzin Z., Zahidi I., Raghunandan M.E., Talei A. Potential application of spent mushroom compost (SMC) biochar as low-cost filtration media in heavy metal removal from abandoned mining water: a review // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023. Vol. 20. Iss. 6. P. 6989-7006. DOI: [10.1007/s13762-022-04617-7](https://doi.org/10.1007/s13762-022-04617-7)
20. Бахирева О.И., Соколова М.М., Маньковская О.Ю., Пан Л.С. Получение биосорбента на основе вермикулита для доочистки сточных вод от ионов никеля // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. 2021. № 4. С. 5-15. DOI: [10.15593/2224-9400/2021.4.01](https://doi.org/10.15593/2224-9400/2021.4.01)
21. Мосендз И.А., Кременецкая И.П., Дрогобужская С.В., Алексеева С.А. Сорбция тяжелых металлов фильтрующими модулями с вермикулит-сунгулитовыми продуктами // *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2020. Т. 23. № 2. С. 182-189. DOI: [10.21443/1560-9278-2020-23-2-182-189](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-2-182-189)
22. Afolabi F.O., Musonge P., Bakare B.F. Bio-sorption of a bi-solute system of copper and lead ions onto banana peels: characterization and optimization // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2021. Vol. 19. Iss. 1. P. 613-624. DOI: [10.1007/s40201-021-00632-x](https://doi.org/10.1007/s40201-021-00632-x)
23. Rahman D.Z., Vijayaraghavan J., Thivya J. A comprehensive review on zinc(II) sequestration from wastewater using various natural/modified low-cost agro-waste sorbents // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. Vol. 13. Iss. 7. P. 5469-5499. DOI: [10.1007/s13399-021-01822-1](https://doi.org/10.1007/s13399-021-01822-1)
24. Duwiewuah A.B., Amadu Y., Gameli B.H.R. *et al.* Spent Chinese Green Tea as an Adsorbent for Simultaneous Removal of Potentially Toxic Metals from Aqueous Solution // *Chemistry Africa*. 2022. Vol. 5. Iss. 6. P. 2107-2114. DOI: [10.1007/s42250-022-00459-5](https://doi.org/10.1007/s42250-022-00459-5)
25. Ahmed M., Mavukkandy M.O., Giwa A. *et al.* Recent developments in hazardous pollutants removal from wastewater and water reuse within a circular economy // *Clean Water*. 2022. Vol. 5. № 12. DOI: [10.1038/s41545-022-00154-5](https://doi.org/10.1038/s41545-022-00154-5)
26. Thakur A., Sharma N., Singh J. Synthesis of copper oxide (CuO) nanoparticles for the efficient removal of fluoride from an aqueous solution // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2024. Vol. 333. Iss. 6. P. 2857-2865. DOI: [10.1007/s10967-023-09066-1](https://doi.org/10.1007/s10967-023-09066-1)
27. Barragán-Peña P., Macedo-Miranda M.G., Olguín M.T. Cadmium removal from wastewater in a fixed-bed column system with modified-natural clinoptilolite-rich tuff // *Chemical Papers*. 2021. Vol. 75. Iss. 2. P. 485-491. DOI: [10.1007/s11696-020-01314-y](https://doi.org/10.1007/s11696-020-01314-y)
28. Chang Y.S., Au P.I., Mubarak N.M. *et al.* Adsorption of Cu(II) and Ni(II) ions from wastewater onto bentonite and bentonite/GO composite // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. Iss. 26. P. 33270-33296. DOI: [10.1007/s11356-020-09423-7](https://doi.org/10.1007/s11356-020-09423-7)
29. Wong S., Ghafar N.A., Ngadi N. *et al.* Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste // *Scientific reports*. 2020. Vol. 10. № 2928. DOI: [10.1038/s41598-020-60021-6](https://doi.org/10.1038/s41598-020-60021-6)
30. Khadem M., Husni Ibrahim A., Mokashi I. *et al.* Removal of heavy metals from wastewater using low-cost biochar prepared from jackfruit seed waste // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. Vol. 13. Iss. 16. P. 14447-14456. DOI: [10.1007/s13399-022-02748-y](https://doi.org/10.1007/s13399-022-02748-y)
31. Mladenović N., Kljajević L., Nenadović S. *et al.* The Applications of New Inorganic Polymer for Adsorption Cadmium from Waste Water // *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2020. Vol. 30. Iss. 2. P. 554-563. DOI: [10.1007/s10904-019-01215-y](https://doi.org/10.1007/s10904-019-01215-y)
32. Ambaye T.G., Vaccari M., van Hullebusch E.D. *et al.* Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2021. Vol. 18. Iss. 10. P. 3273-3294. DOI: [10.1007/s13762-020-03060-w](https://doi.org/10.1007/s13762-020-03060-w)
33. Mathabatha T.I.K., Matheri A.N., Belaid M. Peanut Shell-Derived Biochar as a Low-Cost Adsorbent to Extract Cadmium, Chromium, Lead, Copper, and Zinc (Heavy Metals) from Wastewater: Circular Economy Approach // *Circular Economy and Sustainability*. 2023. Vol. 3. Iss. 2. P. 1045-1064. DOI: [10.1007/s43615-022-00207-4](https://doi.org/10.1007/s43615-022-00207-4)
34. Филиппов Д.В., Фуфаева В.А., Шепелев М.В. Сорбция ионов тяжелых металлов из водных растворов мезопористым 2-этилимидазолом никеля // *Журнал неорганической химии*. 2022. Т. 67. № 3. С. 397-402. DOI: [10.31857/S0044457X22030084](https://doi.org/10.31857/S0044457X22030084)
35. Faisal A.A.H., Nassir Z.S., Rashid H.M. *et al.* Neural network for modeling the capture of lead and cadmium ions from wastewater using date palm stones // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022. Vol. 19. Iss. 11. P. 10563-10576. DOI: [10.1007/s13762-021-03883-1](https://doi.org/10.1007/s13762-021-03883-1)
36. Saranya S., Gandhi A.D., Suriyakala G. *et al.* A biotechnological approach of Pb(II) sequestration from synthetic wastewater using floral wastes // *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. Iss. 8. № 1357. DOI: [10.1007/s42452-020-3172-7](https://doi.org/10.1007/s42452-020-3172-7)
37. Elguera J.C.T., Barrientos E.Y., Wrobel K., Wrobel K. Effect of cadmium (Cd(II)), selenium (Se(IV)) and their mixtures on phenolic compounds and antioxidant capacity in *Lepidium sativum* // *Acta Physiologiae Plantarum*. 2013. Vol. 35. Iss. 2. P. 431-441. DOI: [10.1007/s11738-012-1086-8](https://doi.org/10.1007/s11738-012-1086-8)



38. Bożym M., Król A., Mizerna K. Leachate and contact test with *Lepidium sativum* L. to assess the phytotoxicity of waste // International Journal of Environmental Science and Technology. 2021. Vol. 18. Iss. 7. P. 1975-1990. DOI: [10.1007/s13762-020-02980-x](https://doi.org/10.1007/s13762-020-02980-x)
39. Журова В.Г., Светличная М.С. Изучение влияния ионов калия, кальция и магния на рост и развитие растений // Достижения науки и образования. 2018. № 14 (36). С. 13-15.
40. Аканова Н.И., Козлова А.В., Мухина М.Т. Роль магния в системе питания растений // Агрохимический вестник. 2021. № 6. С. 66-72. DOI: [10.24412/1029-2551-2021-6-014](https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-6-014)
41. Иванищев В.В. Доступность железа в почве и его влияние на рост и развитие растений // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2019. Вып. 3. С. 127-138.
42. Riseh R.S., Vazvani M.G., Hajabdollahi N., Thakur V.K. Bioremediation of Heavy Metals by Rhizobacteria // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2023. Vol. 195. Iss. 8. P. 4689-4711. DOI: [10.1007/s12010-022-04177-z](https://doi.org/10.1007/s12010-022-04177-z)
43. Пухальский Я.В., Лоскутов С.И., Воробьев Н.И. и др. Изменение биохимического профиля корневых экзометаболитов гороха посевного под воздействием тяжелых металлов // Российская сельскохозяйственная наука. 2023. № 1. С. 53-63. DOI: [10.31857/S2500262723010106](https://doi.org/10.31857/S2500262723010106)
44. El-Moustaqim K., Tallou A., Mabrouki J. et al. Phytoremediation Processes for the Removal of Heavy Metals / Integrated Solutions for Smart and Sustainable Environmental Conservation. Cham: Springer, 2024. P. 33-46. DOI: [10.1007/978-3-031-55787-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-55787-3_3)
45. Ferrarezi R.S., Lin X., Gonzalez Neira A.C. et al. Substrate pH Influences the Nutrient Absorption and Rhizosphere Microbiome of Huanglongbing-Affected Grapefruit Plants // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13. № 856937. DOI: [10.3389/fpls.2022.856937](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.856937)
46. Çalişkan B., Çalişkan A.C. Potassium Nutrition in Plants and Its Interactions with Other Nutrients in Hydroponic Culture / Improvement of Quality in Fruits and Vegetables Through Hydroponic Nutrient Management. InTechOpen, 2018. P. 9-21. DOI: [10.5772/intechopen.71951](https://doi.org/10.5772/intechopen.71951)
47. Kailiu Xie, Ismail Cakmak, Shiyu Wang et al. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants // The Crop Journal. 2020. Vol. 9. Iss. 2. P. 249-256. DOI: [10.1016/j.cj.2020.10.005](https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.10.005)

**Авторы:** Н.Ю.Антонинова, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, [natal78@list.ru](mailto:natal78@list.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8503-639X> (Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия), А.В.Собенин, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5513-5680> (Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия), А.И.Усманов, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3650-0467> (Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия), А.А.Горбунов, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9057-0896> (Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.