



Научная статья

Обоснование возможности применения отходов производства гуминовых препаратов для очистки сточных вод от металлов (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} , 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 (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+}) с целью разработки эффективных мероприятий по экологической реабилитации // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 421-432. EDN NYTBVJN

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 предопределяют 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.¹ 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

¹ 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 ожидаемо, 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 (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , 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 (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , 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 крестоцвета *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 –

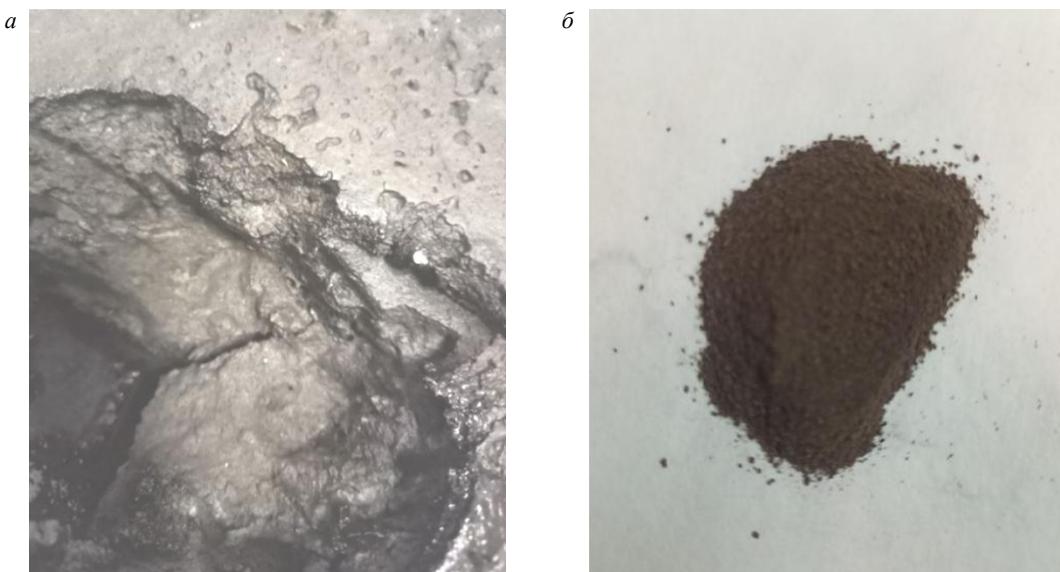


Рис.1. Отходы производства гуминовых кислот: *а* – до обработки; *б* – после обработки

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 °C 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/м³, 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: Cd²⁺ – 0,01 (ПДК – 0,005); Zn²⁺ – 0,2 (ПДК – 0,01); Mg²⁺ – 849,60 (ПДК – 40); Cu²⁺ – 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 3052². Процесс начинался с добавления 0,5 г образца, к которому приливали 9 мл HNO₃ (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 °C, 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 1M HNO₃.

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;

² MARS 6. Microwave Acid Digestion. Method Note Compendium. CEM, 2018. 320 р.



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 Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , 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 реагентов «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 приливаляемого 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 кress-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: Cd^{2+} – 0,20 (ПДК = 0,005); Zn^{2+} – 50,12 (ПДК – 0,01); Mg^{2+} – 322,50 (ПДК – 40); Cu^{2+} – 78,10 (ПДК – 0,001); Fe^{3+} – 147,71 (ПДК – 0,1); Co^{2+} – 1,73 (ПДК – 0,01); Ca^{2+} – 33,20 (ПДК – 180); 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 окончанию 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):

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

где Gs – количество пророщенных семян в образце; а Gc – количество пророщенных семян в контроле (дистиллированная вода);

$$Ls / Lc \cdot 100 = RRG, \quad (4)$$

Ls – длина корешка пророщенных семян в образце; Lc – 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 (рН). 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 (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , 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 (Cu^{2+} , 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 Cu^{2+} , 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 (Cu^{2+} , 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 подтвальных воды месторождения Кабан-1 [8]. Результаты приведены в табл.1 и на рис.3.

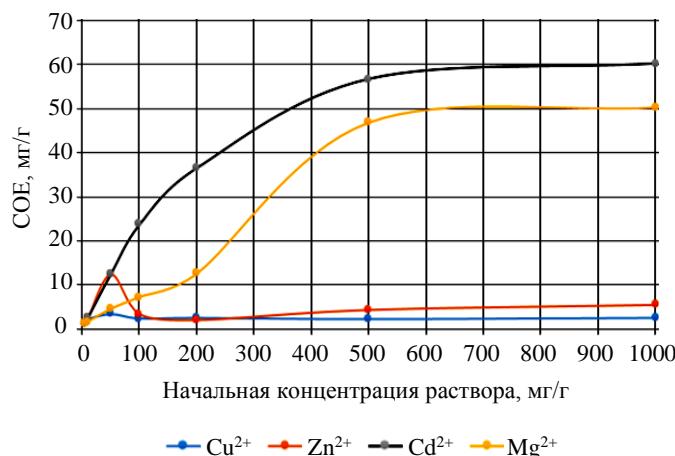


Рис.2. Влияние начальной концентрации ионов металлов в растворе на процесс очистки сточных вод ОГП (монометаллические растворы)

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 ²⁺	Zn ²⁺	Mg ²⁺	Cu ²⁺	
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 ²⁺	Zn ²⁺	Mg ²⁺	Cu ²⁺	
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

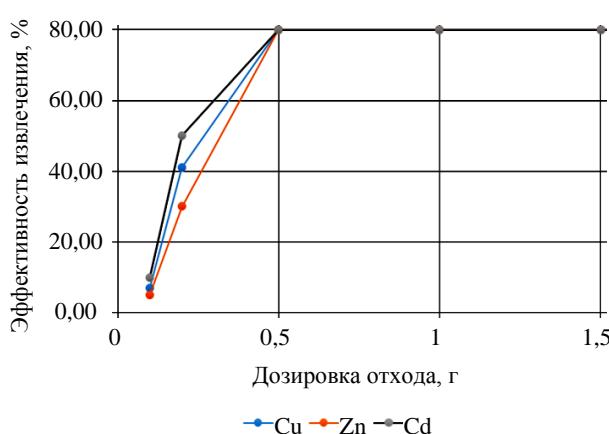


Рис.3. Влияние дозировки отходов на степень извлечения ионов металлов из раствора

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 фильтратах 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).

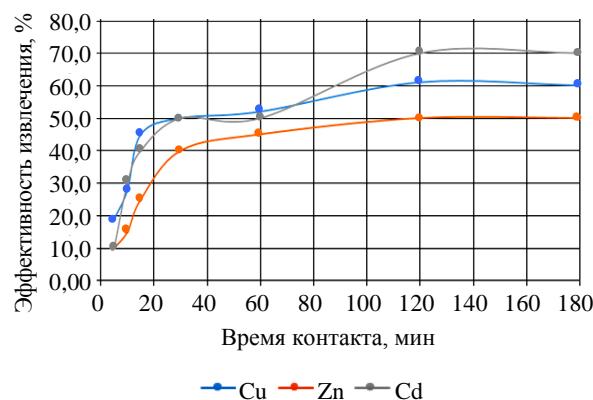


Рис.4. Влияние времени контакта на степень извлечения ионов металлов из раствора

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 подотвальных 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 рыбохозяйственного значения по магнию, в рамках данного исследования для оперативного контроля острой токсичности проб была применена методика биотестирования, включающая использование кress-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

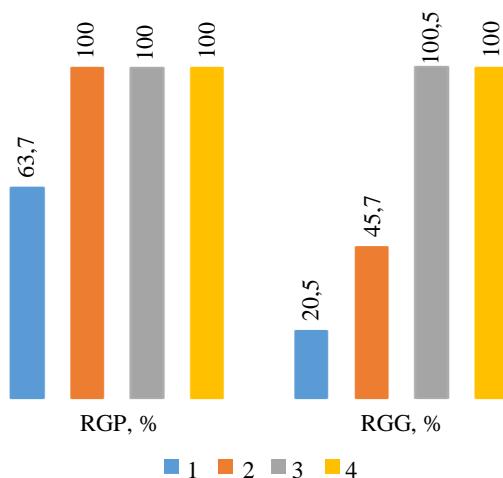


Рис.5. Влияние различных составов сточных вод (1-4 в табл.4) на показатели всхожести (RGP) и роста корней (RGG) кress-салата *Lepidium sativum L.*

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

Одним из главных преимуществ использования кress-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 прощены 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) дистилированная вода.

Таблица 4

Влияние различных составов сточных вод на всхожесть и рост кress-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	Дистилированная 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	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 усвоемость 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 рН 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 рН (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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_331)
4. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Проблемы самореабилитации гидросфера 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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 горнometаллургического 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 Fe^{3+} , Cu^{2+} и Pb^{2+} фильтрующими загрузками, 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., Raghuandan 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. *Мосендж И.А., Кременецкая И.П., Дрогобужская С.В., Алексеева С.А.* Сорбция тяжелых металлов фильтрующими модулями с вермикулит-сунгилитовыми 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. *Duwiejuah 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-этилимидазолатом 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.* 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
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
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
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
44. El-Mousaqa 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
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
46. Çalışkan B., Çalışkan 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
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

Авторы: Н.Ю.Антонинова, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, 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.