УДК 622.268:504.06 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-3-99-108

Обоснование параметров применения природоподобных материалов на основе отходов горнодобывающей промышленности в качестве мелиорантов

Наталья Юрьевна АНТОНИНОВА*
Артем Вячеславович СОБЕНИН**
Альберт Исмагилович УСМАНОВ***
Алексей Александрович ГОРБУНОВ****

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Цель работы – обоснование параметров дозирования материалов в качестве мелиорантов, полученных после процесса очистки сточных вод от тяжелых металлов.

Методика исследований. Для достижения поставленных целей был использован комплексный подход, включающий обзор литературы, биотестирование и атомно-абсорбционный анализ (Varian AA 240 FS) для определения содержания тяжелых металлов в растениях. Это позволило оценить влияние различных дозировок полученных материалов на показатели роста и безопасность использования в качестве мелиоранта. Для повышения достоверности результатов эксперименты проводились в трехкратной повторности с использованием стандартных статистических методов обработки данных. В качестве тест-объекта использовался кресс-салат (*Lepidium sativum* L.).

Анализ результатов. Показано, что внесение отходов в оптимальной дозировке (60 г/м^2) способствует увеличению биомассы растений, не приводя к накоплению кадмия. Превышение дозировки (120–300 г/м^2) не усиливает рост, а напротив, приводит к увеличению содержания кадмия в растениях и снижению всхожести. Низкие дозы (25–100 г/м^2) могут стимулировать рост корней и всхожесть за счет микроэлементов.

Выводы. Подтверждена перспективность использования отходов производства для улучшения характеристик почвы и повышения продуктивности растений, что является потенциально устойчивым решением для горнотехнических систем. Результаты исследования позволяют разработать конкретные рекомендации по применению мелиорантов для рекультивации нарушенных земель. Установление безопасных и эффективных дозировок способствует минимизации экологических рисков и обеспечивает ресурсосберегающий подход к утилизации отходов, полученных в процессе очистки сточных вод. Дальнейшие исследования необходимы для оценки долгосрочного воздействия и оптимизации состава мелиорантов относительно различных почвенных условий и видов растений.

***Ключевые слова*:** тяжелые металлы, сточные воды, горнотехническая система, отходы производств, мелиоранты, биотестирование, природоподобные материалы.

Введение

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами остается одной из ключевых экологических проблем современности, оказывая прямое воздействие на экосистемы [1–3] и влияя на устойчивость функционирования горнотехнических систем (ГТС) [4, 5]. Эти токсичные элементы, включая цинк, медь, кадмий, обладают уникальной способностью аккумулироваться в биологических тканях, вызывая хронические заболевания почек, нервной системы и онкологические патологии [6–8]. Особую опасность представляет их персистентность – период полувыведения из организма человека может быть от нескольких месяцев до нескольких десятков лет, а из экосистем – от десятков до тысяч лет [9–11].

Основными источниками загрязнения выступают антропогенные факторы: металлургическая и горнодобывающая промышленность, транспортные системы и агропромышленный комплекс [12]. Природные процессы, такие как вулканическая активность и эрозия горных по-

✉natal78@list.ru
https://orcid.org/0000-0002-8503-639X
**arsob@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-5513-5680
***albert3179@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3650-0467
****alex021297@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9057-0896

Таблица 1. Элементный состав отходов производств и сточных кислых вод до обработки
Table 1. Elemental composition of industrial waste and acidic wastewater before treatment

Химический элемент	Отходы железомагниевого производства, мг/кг	Сточные воды месторождения Кабан-1, мг/л
Cu	41,25 ± 1,14	78,10 ± 2,94
Mg	175 000,00 ± 3498,32	322,50 ± 5,98
Fe	52 000,00 ± 1984,29	147,71 ± 3,94
Zn	77,70 ± 1,84	50,12 ± 1,14
Cd	< 1,00	0,20 ± 0,01
Co	119,75 ± 1,41	1,73 ± 0,01
K	30 140,00 ± 787,40	5,26 ± 0,96

Рисунок 1. Отходы железомагниевого производства (ЖМКС)
Figure 1. Waste from iron-magnesium production (LCMS)

род, также вносят вклад в общий объем загрязнений [13]. Техногенные выбросы распространяются через атмосферные аэрозоли, кислотные осадки и гидрологические сети, создавая кумулятивный эффект в почвенно-растительных комплексах [14, 15].

Современные технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов используют комбинацию физико-химических и биологических методов, обеспечивающих удаление токсинов до нормативов ПДК [16].

Химическое осаждение – базовый метод для обработки высококонцентрированных стоков. Применение извести, сульфидов или карбонатов натрия приводит к образованию нерастворимых гидроксидов или сульфидов металлов. Эффективность достигает 85–95 %, но требует последующей утилизации осадков и шламов [17, 18].

Мембранные технологии (обратный осмос, нанофильтрация) гарантируют тонкую очистку до 99,99 % благодаря полупроницаемым мембранам с размером пор 0,1–1 нм. Подходят для извлечения металлов из низкоконцентрированных стоков и получения технической воды, но необходима предварительная очистка [19, 20].

Ключевым трендом становится интеграция методов рециклинга, где образованные в результате деятельности предприятий отходы возвращаются обратно в хозяйственную деятельность, такой подход позволяет существенно снижать экологическую нагрузку и плату за причиненный ущерб окружающей среде [21–23].

Так, в сельском хозяйстве [24] Краснодарского края проблема кислотности почв является актуальной, особенно на землях сельскохозяйственного назначения. Использование серпентинита в качестве мелиоранта улучшает плодородие кислых почв, а при смешивании с кальцийсодержащими веществами, такими как доломитовая мука, его применение становится возможным и на нейтральных почвах. Это не только способствует повышению урожайности, но и снижает экологическую нагрузку от применения традиционных удобрений [24].

Многолетние полевые испытания [25] подтвердили высокую эффективность нейтрализованного фосфогипса, производимого ОАО «ЕвроХим-БМУ», в рисовых севооборотах. Этот побочный продукт не только повышает плодородие почвы и улучшает качество урожая риса. Применение фосфогипса позволяет существенно снизить содержание натрия в почве (в 1,5–2,5 раза), одновременно увеличивая сумму поглощенных оснований и повышая долю кальция, что положительно сказывается на структуре почвы. Экономическая выгода применения фосфогипса обусловлена его составом: до 4 % P_2O_5 и до 21 % серы в усвояемой растениями форме, что компенсирует затраты на транспортировку и внесение в почву традиционных удобрений. Внедрение этой технологии на площади хотя бы в 1 млн га может ежегодно приносить экономию в размере 1,5–1,8 млрд руб. [25].

Таким образом, интеграция рециклинга в горнотехнические системы и использование вторичных ресурсов в качестве мелиорантов становятся ключевыми элементами устойчивого развития как природных, так и горнотехнических систем, позволяя минимизировать экологическую нагрузку и оптимизировать использование ресурсов.

Целью работы является обоснование параметров дозирования материалов в качестве мелиорантов, полученных после процесса очистки сточных вод от тяжелых металлов.

Материалы и методы

Отходы

Отходы железомагниевого производства (ЖМКС) представляют собой пастообразную массу красно-коричневого цвета, богатую магнием, медью, железом и другими элементами (табл. 1, рис. 1). Они являются побочным продуктом переработки серпентинита, используемой для получения оксида магния.

Сточные воды

Сточные воды были отобраны на территории отработанного медноколчеданного месторождения Кабан-1, расположенного в Верхнетуринском городском округе Свердловской области. Месторождение находится в 190

Рисунок 2. Фрагмент промплощадки отработанного месторождения Кабан-1
Figure 2. Fragment of the industrial site of the spent Kaban-1 deposit

км от Екатеринбурга и в 13 км от г. Верхняя Тура, вблизи промышленных центров Красноуральск (36 км) и Кушва (30 км). Месторождение Кабан-1 – это техногенно измененная территория площадью более 80 га, характеризующаяся наличием двух затопленных карьеров, отвалов и обедненной растительности. Водная поверхность занимает 11 га (рис. 2) [16].

Элементный анализ и пробоподготовка

Для озоления образцов применялась микроволновая система MARS 5 Digestion Microwave System от компании CEM Corporation из США в соответствии с методикой EPA 3052. Использовали концентрированную HNO_3 и HF. После обработки, фильтрования и разбавления до объема 50 мл получался прозрачный образец без посторонних частиц [16].

Способ получения мелиорантов основан на технико-технологических рекомендациях по очистке промышленных сточных вод от тяжелых металлов с применением отходов железомагниевого производства (ЖМКС) и отходов производства гуминовых препаратов (ОГП). Процесс включает четыре последовательных этапа.

Этап 1. Накопление и усреднение сточных вод. Цель этого этапа – обеспечить однородность состава сточных вод, что необходимо для стабильности и эффективности дальнейших процессов очистки. Усреднение минимизирует колебания концентраций загрязнителей и pH, что упрощает дозирование реагентов и сорбентов.

Этап 2. Первый этап очистки – осаждение с использованием ЖМКС. На этом этапе ЖМКС используется для осаждения тяжелых металлов. ЖМКС как источник магния, меди и железа реагирует с тяжелыми металлами, образуя нерастворимые соединения, которые выпадают в осадок. Процесс включает нейтрализацию, образование осадка, увеличение концентрации магния в растворе и повышение pH. Далее осадок высушивается и гранулируется для получения ферромагниевого мелиоранта (ФММ).

Этап 3. Второй этап очистки – сорбция с применением ОГП. Этот этап предполагает доочистку сточных вод от меди, кадмия и цинка с использованием ОГП в качестве сорбента. Гуминовые вещества, содержащиеся в ОГП, обладают способностью связывать тяжелые металлы, что приводит к их удалению из воды. Процесс сопровождается увеличением концентрации калия в растворе, кроме того, pH доводится до нейтрального значения. Осадок высушивается и гранулируется для получения гуминового мелиоранта (ГМ).

Этап 4. Завершающий этап – складирование доочищенной воды для дальнейшего использования. После двух этапов очистки вода складируется для дальнейшего использования в хозяйственных целях.

Эксперимент по влиянию дозировки мелиорантов на рост и развитие растений

В рамках эксперимента было изучено влияние дозировки отходов, полученных после двухэтапной очистки подотвальных вод месторождения Кабан-1 от ионов металлов, на рост и развитие кресс-салата [16].

При проведении опытов в чашки Петри был помещен почвенный грунт, к которому добавлялись образцы отходов весом 0,2; 0,5; 1; 1,5 и 2 г. Чашки плотно закрывали крышкой и встряхивали. На подготовленные субстраты были выложены семена кресс-салата. В каждую чашку Петри было помещено по 30 семян, и раз в сутки производился полив дистиллированной водой, при этом почвенный грунт использовался в качестве контроля [16].

Длительность эксперимента составила 7 дней, в течение которых наблюдалось влияние различных дозировок отходов на рост и развитие растений. Этот подход позволяет определить оптимальные условия для выращивания культур на почвах, обогащенных очищенными от ионов металлов отходами.

Морфометрические показатели

По окончании всех экспериментов измеряли длину корней и всхожесть семян, а также содержание исследуемых химических элементов в особях растений. 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 (RGG), % [16]:

$$G_s/G_c \cdot 100 = \text{RGP}, \quad (1)$$

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

Таблица 2. Показатели роста и развития и элементный анализ особей кресс-салата (*Lepidium sativum* L.), выращенных на субстратах с различной дозировкой мелиорантов
Table 2. Growth and development indicators and elemental analysis of watercress (*Lepidium sativum* L.) specimens grown on substrates with different dosages of ameliorants

Параметр	Почва 100 % (контроль)	Дозировка мелиоранта, г/м²				
		25	60	120	200	300
Общая биомасса, мг	35,00 ± 2,00	35,00 ± 3,15	50,00 ± 5,00	50,00 ± 5,11	55,00 ± 6,13	55,00 ± 5,51
RGP, % (процент прорастания)	100,00 ± 0,00	83,33 ± 6,53	100,00 ± 0,00	93,33 ± 4,43	100,00 ± 0,00	100,00 ± 0,00
RGG, % (относительная длина корней)	100,00 ± 0,00	59,00 ± 7,14	96,00 ± 4,31	77,00 ± 5,87	70,00 ± 4,91	56,00 ± 6,66
Cu, мг/кг	0,62 ± 0,11	7,00 ± 1,74	6,84 ± 1,09	14,35 ± 2,76	21,16 ± 3,87	21,29 ± 3,75
Zn, мг/кг	52,89 ± 6,76	24,73 ± 2,17	52,89 ± 3,65	59,50 ± 3,58	90,53 ± 5,46	90,71 ± 7,28
Cd, мг/кг	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	0,35 ± 0,20	0,62 ± 0,30	0,88 ± 0,40
Fe, мг/кг	413,78 ± 44,13	1274,47 ± 246,44	1244,13 ± 222,10	1904,00 ± 327,84	2372,00 ± 539,33	3827,83 ± 599,00
Mg, мг/кг	10 627,56 ± 1323,00	4741,33 ± 543,74	9538,57 ± 1148,71	16 268,00 ± 3475,00	17 182,67 ± 4985,12	9081,33 ± 1298,00
K, мг/кг	15 384,00 ± 4958,00	47 548,67 ± 8476,33	44 373,78 ± 6414,09	57 711,50 ± 6663,81	60 025,78 ± 8 161,31	73 949,17 ± 9681,11

$$L_s/L_c \cdot 100 = \text{RGG}, \quad (2)$$

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

Результаты и обсуждения

Тяжелые металлы, такие как медь (Cu), цинк (Zn), кадмий (Cd) и железо (Fe), попадая в окружающую среду через промышленные отходы, оказывают двойственное воздействие на растения. В низких концентрациях некоторые из них выполняют важные физиологические функции, но при превышении пороговых значений становятся токсичными, влияя на морфологию, продуктивность и биохимические процессы [26, 27].

Медь участвует в азотном обмене, синтезе хлорофилла и повышает устойчивость растений. Однако ее избыток вызывает торможение роста корней и хлороз листьев. Цинк активирует ферментные системы, регулирует дыхание и стрессоустойчивость. При повышенных дозах нарушает поглощение фосфора и марганца, приводя к фитотоксичности. Кадмий не имеет с особых полезных функций: он ингибирует фотосинтез, вызывает краевой некроз листьев и блокирует восстановление нитратов. Его накопление в тканях растений создает риск трофического перенасыщения в пищевых цепях [6, 28, 29]. Железо критически важно для синтеза хлорофилла, но избыток приводит к потемнению листьев и подавлению усвоения фосфора [30], табл. 2.

Кадмий, поглощаемый растениями из окружающей среды, накапливается в их тканях и может передаваться по пищевым цепям. Этот процесс, называемый трофическим переносом, приводит к увеличению концентрации

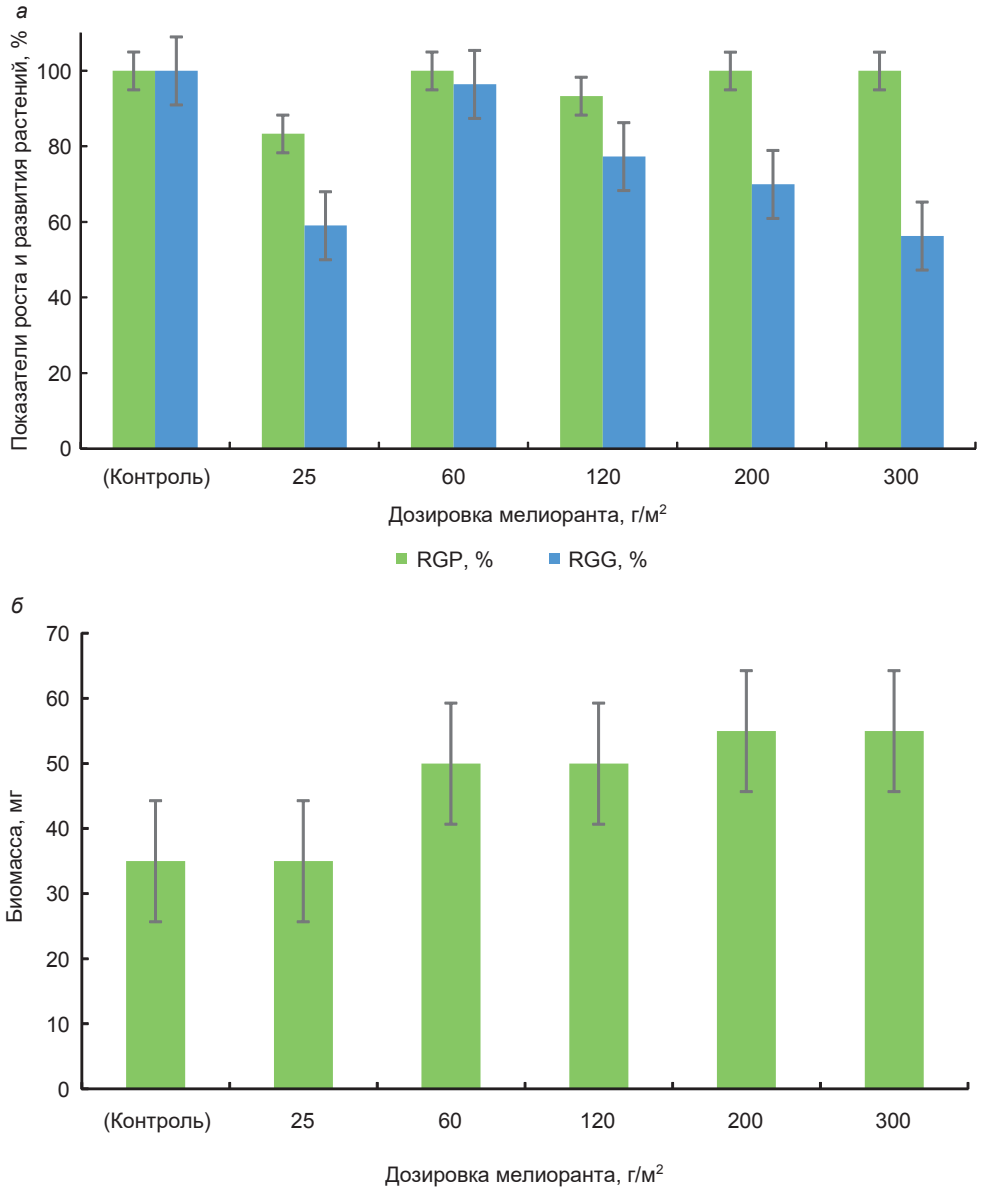

Рисунок 3. Влияние дозировки мелиорантов на показатели: *а* – всхожести (RGP), роста корней (RGG); *б* – биомассу кресс-салата (*Lepidium sativum* L.)

Figure 3. The effect of the dosage of meliorants on the indicators of: *а* – germination (RGP), root growth (RGG); *б* – biomass of watercress (*Lepidium sativum* L.)

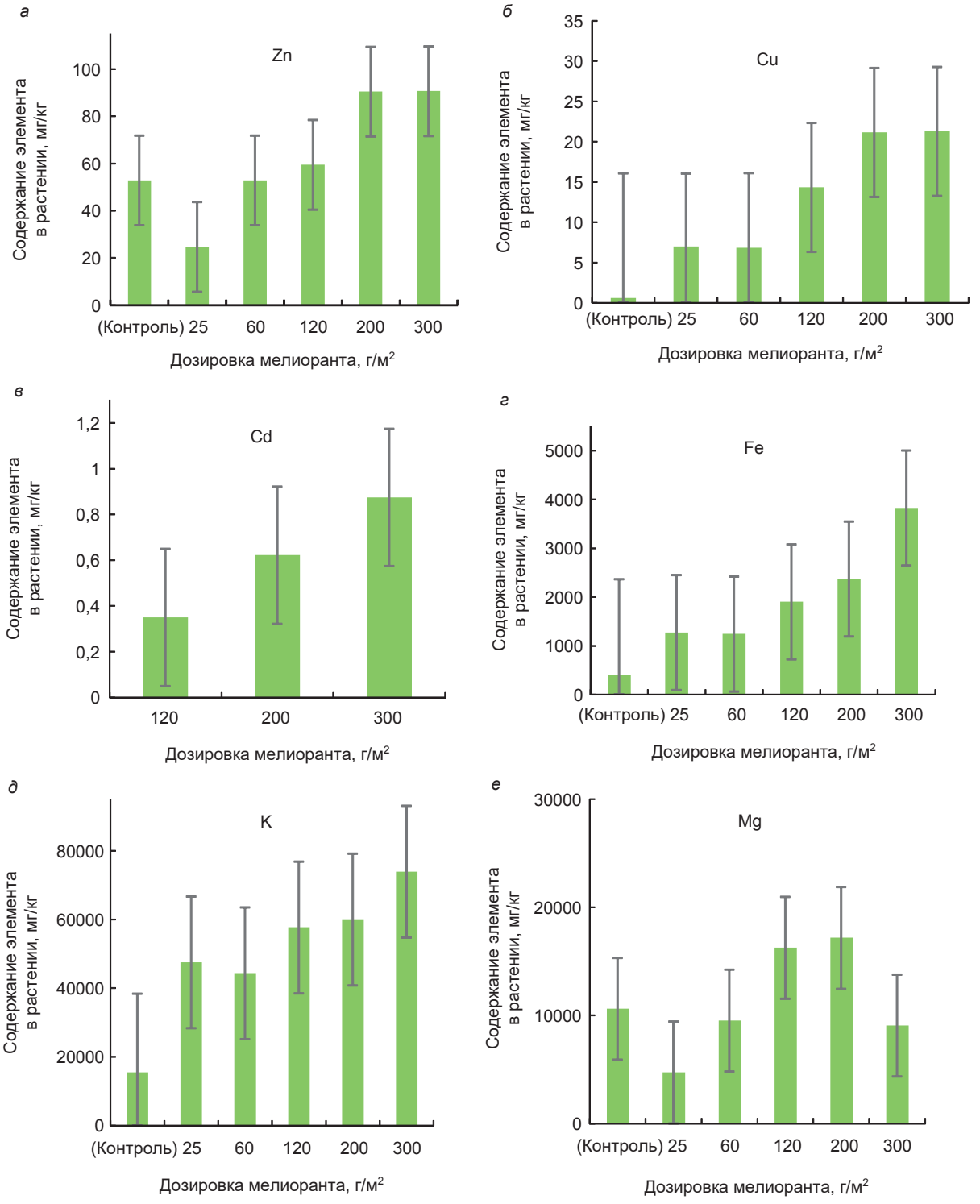

Рисунок 4. Содержание химических элементов в особях растений на примере кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) при дозировке мелиорантов от 25 до 300 г/м²: *а* – цинк; *б* – медь; *в* – кадмий; *г* – железо; *д* – калий; *е* – магний
Figure 4. The content of chemical elements in individuals of watercress plants (*Lepidium sativum* L.) at a dosage of meliorants from 25 to 300 g/m²: *а* – zinc; *б* – copper; *в* – cadmium; *г* – iron; *д* – potassium; *е* – magnesium

вредного вещества в организмах, занимающих более высокие трофические уровни [31].

В эксперименте изучалось влияние мелиорантов (ФММ) на основе производственных отходов на развитие кресс-салата (*Lepidium sativum* L.). Разные дозы отходов (25–300 г/м²) добавлялись в почву, после чего оценивались морфологические параметры растений: длина корней, всхожесть и содержание химических элементов в их тканях (табл. 2)

Исследование влияния различных дозировок мелиорантов на основе отходов производства (от 25 до 300 г/м²) на кресс-салат показало зависимость морфологических параметров от концентрации. Анализ таблицы данных (табл. 1) выявил, что наиболее эффективным субстратом

является образец с дозировкой 60 г/м². Растения, выращенные на этом субстрате, не содержали кадмия, а содержание других элементов (железо, медь, цинк, калий и магний) было средним. Всхожесть и относительная длина корней в этом образце были близки к контрольным значениям (100 % и 96 % соответственно), а биомасса растений (50 мг) была значительно выше, чем в контрольном образце (35 мг). Особое внимание уделяется повышенному содержанию калия и магния во всех исследуемых образцах по сравнению с контролем (рис. 3).

Результаты эксперимента показали, что дозировка отходов производства не имеет существенного влияния на рост и развитие кресс-салата по сравнению с контрольным образцом. При этом отмечается, что оптимальная дозировка (60 г/м²) способствовала увеличению биомассы растений, одновременно с этим излишнее использование отходов (дозировки от 120 до 300 г/м²) не приводит к дополнительному увеличению исследуемых показателей роста, как показывает рис. 4. Также необходимо уточнить, что с дозировки 120 г/м² и выше наблюдается увеличение содержания кадмия в растениях в диапазоне от 0,35 до 0,88 мг/кг. Это указывает на необходимость осторожного использования субстрата с более высокими дозировками, чтобы избежать накопления химических элементов в растениях.

Низкие дозы (25–100 г/м²) могут стимулировать рост корней и всхожесть за счет микроэлементов (Zn, Cu), участвующих в метаболизме. Высокие дозы (200–300 г/м²) приводят к снижению длины корней на 15–30 % и всхожести на 20–40 %.

Проведенное исследование демонстрирует перспективность использования мелиорантов на основе отходов производства для улучшения характеристик почвы и повышения продуктивности растений, в частности кресс-салата. Выбор кресс-салата в качестве тестовой культуры обусловлен его быстрым ростом и чувствительностью к условиям среды, что позволяет оперативно оценить влияние мелиорантов. Важность повышенного содержания калия и магния особенно актуальна в условиях загрязнения окружающей среды, где растения испытывают стресс и нуждаются в дополнительной поддержке для обеспечения нормального фотосинтеза и метаболизма [32, 33].

Выводы

Внесение отходов горнодобывающей промышленности в качестве мелиорантов показало перспективность улучшения почвенных характеристик и стимуляции роста растений (на примере кресс-салата).

Экспериментально установлена оптимальная дозировка (60 г/м²), обеспечивающая стимуляцию роста без риска накопления кадмия.

Использование отходов горной промышленности в качестве мелиорантов представляет собой потенциально устойчивое решение для горнотехнических систем, позволяющее одновременно улучшить состояние почв и решить проблему утилизации отходов.

Дальнейшие исследования необходимы для оценки долгосрочного воздействия и оптимизации состава мелиорантов для различных почвенных условий и видов растений.

Благодарности

Статья подготовлена в рамках Государственного задания № 075-00410-25-00 ПР. Тема 2 (2025–2027). Геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении ресурсов недр (FUWE-2025-0002), рег. № 1022040300092-1-1.5.1.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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 вузов. Горный журнал. 2022. № 3. С. 120–129. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-3-120-129
2. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Наволокина В. Ю. Оценка эффективности очистки кислых шахтных вод (на примере медноколчеданных рудников Среднего Урала) // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 388–401. https://elibrary.ru/SBKRCK
3. Плохов А. С., Харько П. А., Пашкевич М. А. Исследование влияния хвостового хозяйства медноколчеданного месторождения на поверхностные воды // ГИАБ. 2021. № 4. С. 57–68. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_57
4. Бурмистров К. В., Осинцев Н. А. Принципы устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 4. С. 179–195. https://doi.org/10.18799/24131830/2020/4/2606; https://elibrary.ru/TZVRAB
5. Антонинова Н. Ю., Рыбникова Л. С., Славиковская Ю. О., Шубина Л. А. Эколого-экономические аспекты выбора направлений реабилитации территорий размещения промышленных отходов горно-металлургического комплекса // Горная промышленность. 2022. № S1. С. 71–77. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-71-77
6. Zhushan Fu., Shuhua Xi. The effects of heavy metals on human metabolism // Toxicology Mechanisms and Methods. 2020. Vol. 30. Issue 3. P. 167–176. https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1701594
7. Mir A. R., Pichtel J., Hayat S. Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil // BioMetals. 2021. Vol. 34(4). P. 737–759. https://doi.org/10.1007/s10534-021-00306-z
8. Габараева З. Г., Макиева Д. Ч. Действие тяжелых металлов на организм человека // Образование и право. 2020. № 11. С. 302–304. https://doi.org/10.24411/2076-1503-2020-11146
9. Assadian E., Zarei M. H., Gilani A. G., Farshin M., Degampanah H., Pourahmad J. Toxicity of Copper Oxide (CuO) Nanoparticles on Human Blood Lymphocytes // Biological Trace Element Research. 2018. Vol. 184. P. 350–357. https://doi.org/10.1007/s12011-017-1170-4
10. Naz S., Gul A., Zia M. Toxicity of copper oxide nanoparticles: a review study // IET Nanobiotechnology. 2020. Vol. 14. Issue 1. P. 1–13. https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2019.0176
11. Chen F.-Ch., Huang C.-M., Yu X. W., Chen Ya. Yu. Effect of nano zinc oxide on proliferation and toxicity of human gingival cells // Human & Experimental Toxicology. 2022. Vol. 41. P. 1–10. https://doi.org/10.1177/09603271221080237
12. Пашкевич М. А., Данилов А. С. Экологическая безопасность и устойчивое развитие // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 153–154.
13. Shevko E. P., Gora M. P., Kokhanova S. P., Panin G. L. The Formation of the Composition of Thermal Waters of Present-Day Volcanoes Based on the Example of the Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kuril Islands // Russian Journal of Pacific Geology. 2023. Vol. 17. No. 1. P. 90–100. https://doi.org/10.1134/S1819714023010098

14. Rahman M. M., Hasan M. F., Hasan A. S. M. M., Alam M. S., Biswas P. K., Zaman M. N. Chemical weathering, provenance, and tectonic setting inferred from recently deposited sediments of Dharla River, Bangladesh // Journal of Sedimentary Environments. 2021. Vol. 6. P. 73–91. https://doi.org/10.1007/s43217-020-00046-z
15. Маковозова З. Э., Соколов А. А., Фоменко В. А., Сарбаева М. Т. Влияние гидрогеологических особенностей Унальского хвостохранилища на загрязнение экосистемы тяжелыми металлами // ГИАБ. 2023. № 6. С. 126–138. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_126
16. 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. https://elibrary.ru/NYTBJH
17. Mohd Yatim S. R., Kasmuri S. N. H., Syahjidan H. N., Mokhtar N. S., Zainuddin N. A. Removing copper, chromium and nickel in industrial effluent using hydroxide precipitation versus sulphide precipitation // Health Scope. 2020. Vol. 3. No. 3. P. 54–60.
18. Benalia M. C., Youcef L., Bouaziz M. G., Achour S., Menasra H. Removal of heavy metals from industrial wastewater by chemical precipitation: Mechanisms and sludge characterization // Arabian Journal for Science and Engineering. 2022. Vol. 47. P. 5587–5599. https://doi.org/10.1007/s13369-021-05525-7
19. Mulungulungu G. A., Mao T., Han K. Efficient removal of high-concentration copper ions from wastewater via 2D g-C_3N_4 photocatalytic membrane filtration // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021. Vol. 623. Article number 126714. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126714
20. Xiang H., Min X., Tang Ch.-J., Sillanpää M., Zhao F. Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review // Journal of Water Process Engineering. 2022. Vol. 49. No. 6. Article number 103023. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103023
21. Xiao Yu. D., Jin H. X., Wang M. L., Guo Yu. L. Collaborative Utilization Status of Red Mud and Phosphogypsum: A Review // Journal of Sustainable Metallurgy. 2022. Vol. 8. P. 1422–1434. https://doi.org/10.1007/s40831-022-00569-x
22. 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. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-1-14-18
23. Da Silva J. M., Freire J. M. A., Taniguchi C. A. K., Diógenes I. C. N., Becker H., Longhinotti E. Blast furnace sludge loaded with phosphate: a potential low-cost fertilizer // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2024. Vol. 26. P. 392–399. https://doi.org/10.1007/s10163-023-01836-z
24. Власенко В. П., Осипов А. В., Костенко В. В. Состав и свойства горной породы серпентинит и возможности использования ее в качестве мелиоранта почв // Агрохимический вестник. 2019. № 4. С. 28–31. https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10054; https://elibrary.ru/TFOQDK
25. Некрасов Р. В., Аканова Н. И., Шеуджен А. Х., Визирская М. М. Перспективы применения фосфогипса, как химического мелиоранта в земледелии Российской Федерации // Международный сельскохозяйственный журнал. 2019. № 6. С. 93–97. https://doi.org/10.24411/2587-6740-2019-16115; https://elibrary.ru/HACJOD
26. Souza S. C. R., Souza L. A., Schiavinato M. A., de Oliveira Silva F. M., de Andrade S. A. L. Zinc toxicity in seedlings of three trees from the Fabaceae associated with arbuscular mycorrhizal fungi // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2020. Vol. 195. Article number 110450. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110450
27. Jung A., Kim S.-H., Yang J.-Y., Jeong J., Lee J. K., Oh J.-H., Lee J. H. Effect of Pulmonary Inflammation by Surface Functionalization of Zinc Oxide Nanoparticles // Toxics. 2021. Vol. 9. Issue 12. P. 1–10. Article number 336. https://doi.org/10.3390/toxics9120336
28. Zulfiqar U., Ayub A., Hussain S., Waraich E. A., El-Esawi M. A., Ishfaq M., Ahmad M., Ali N., Maqsood M. F. Cadmium Toxicity in Plants: Recent Progress on Morpho-physiological Effects and Remediation Strategies // Journal of Soil Science and Plant Nutricion. 2022. Vol. 22. P. 212–269. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00645-3
29. Zhao H., Guan J., Liang Q., Zhang X., Hu H., Zhang J. Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of sassafras seedlings // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Article number 9913. https://doi.org/10.1038/s41598-021-89322-0
30. Zhang Z., Peng R., Xia X., Liu P., Chen S., Xia R., Jiang X., Jiang M., Lin J. Effects of iron on the growth, chlorophyll*a*, total lipids, and fatty acids of Chaetoceros lorenzianus // Journal of Applied Phycology. 2023. Vol. 35. P. 639–647. https://doi.org/10.1007/s10811-023-02912-5
31. Aqeel M., Khalid N., Tufail A., Ahmad R. Z., Akhter M. S., Luqman M., Javed M. T., Irshad M. K., Alamri S., Hashem M., Noman A. Elucidating the distinct interactive impact of cadmium and nickel on growth, photosynthesis, metal-homeostasis, and yield responses of mung bean (*Vigna radiata* L.) varieties // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. P. 27376–27390. https://doi.org/10.1007/s11356-021-12579-5
32. 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.
33. Аканова Н. И., Козлова А. В., Мухина М. Т. Роль магния в системе питания растений // Агрохимический вестник. 2021. № 6. С. 66–72. https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-6-014

Статья поступила в редакцию 23 июля 2025 года

UDC 622.268:504.06 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-3-99-108

Substantiation of parameters for the use of nature-like materials based on mining waste as ameliorants

Natal'ya Yur'evna ANTONINOVA*
Artem Vyacheslavovich SOBENIN**
Al'bert Ismagilovich USMANOV***
Aleksey Aleksandrovich GORBUNOV****

Institute of Mining of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

The purpose of the work is to substantiate the parameters of the dosing of materials as meliorants obtained after the wastewater treatment process from heavy metals.

Research methodology. To achieve these goals, an integrated approach was used, including a literature review, biotesting, and atomic absorption analysis (Varian AA 240 FS) to determine the content of heavy metals in plants. This made it possible to evaluate the effect of different dosages of the obtained materials on growth rates and safety of use as an ameliorant. To increase the reliability of the results, the experiments were carried out three times using standard statistical data processing methods. Lepidium sativum L. was used as a test object.

Analysis of the results. It has been shown that the introduction of waste in an optimal dosage (60 g/m^2) contributes to an increase in plant biomass without leading to the accumulation of cadmium. Exceeding the dosage (120–300 g/m^2) does not enhance growth, but, on the contrary, leads to an increase in the cadmium content in plants and a decrease in germination. Low doses (25–100 g/m^2) can stimulate root growth and germination due to trace elements.

Conclusions. The prospects of using industrial waste to improve soil characteristics and increase plant productivity have been confirmed, which is a potentially sustainable solution for mining systems. The results of the study make it possible to develop specific recommendations for the use of land reclamation agents for the reclamation of disturbed lands. The establishment of safe and effective dosages helps to minimize environmental risks and provides a resource-efficient approach to waste disposal of wastewater treatment. Further research to assess the long-term effects and optimize the composition of ameliorants for various soil conditions and plant species.

***Keywords*:** heavy metals, wastewater, mining system, industrial waste, ameliorants, biotesting, nature-like materials.

Acknowledgements

The article was prepared within the framework of the State Assignment no. 075-00410-25-00 PR. Topic 2 (2025–2027). Geoinformation support for the system assessment of environmental conservation strategies in the development of subsurface resources (FUWE-2025-0002), reg. no. 1022040300092-1-1.5.1.

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

1. Makarov A. B., Talalai A. G., Guman O. M., Khasanova G. G. 2022, Anthropogenic deposits and their impact on the natural environment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [Minerals and Mining Engineering], no. 3, pp. 120–129. (*In Russ.*) https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-3-120-129

2. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Navolokina V. Yu. 2024, Assessment of the effectiveness of acid mine water purification (using the example of copper-mineralized mines in the Middle Urals). *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], vol. 267, pp. 388–401. (*In Russ.*) https://elibrary.ru/SBKRCK

3. Plokhov A. S., Kharko P. A., Pashkevich M. A. 2021, Investigation of the influence of tailings farming of a copper-pyrite deposit on surface waters. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 4, pp. 57–68. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_57

4. Burmistrov K. V., Osintsev N. A. 2020, Principles of sustainable development of mining engineering systems in transition periods. *Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], vol. 331, no. 4. pp. 179–195. (*In Russ.*) https://doi.org/10.18799/24131830/2020/4/2606; https://elibrary.ru/TZVRAB

✉natal78@list.ru
https://orcid.org/0000-0002-8503-639X
**arsob@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-5513-5680
***albert3179@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3650-0467
****alex021297@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9057-0896

5. Antoninova N. Yu., Rybnikova L. S., Slavikovskaya Yu. O., Shubina L. A. 2022, Ecological and economic aspects of the choice of directions for the rehabilitation of industrial waste disposal areas of the mining and metallurgical complex. *Gornaya promyshlennost'* [Mining Industry], no. S1, pp. 71–77. (*In Russ*.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-71-77
6. Zhushan Fu., Shuhua Xi. 2020, The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology Mechanisms and Methods*, vol. 30, issue 3, pp. 167–176. https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1701594
7. Mir A. R., Pichtel J., Hayat S. 2021, Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil. *BioMetals*, vol. 34(4), pp. 737–759. https://doi.org/10.1007/s10534-021-00306-z
8. Gabaraeva Z. G., Makieva D. H. 2020, The effect of heavy metals on the human body. *Obrazovanie i pravo* [Education and law], no. 11, pp. 302–304. (*In Russ*.) https://doi.org/10.24411/2076-1503-2020-11146
9. Assadian E., Zarei M. H., Gilani A. G., Farshin M., Degampanah H., Pourahmad J. 2018, Toxicity of Copper Oxide (CuO) Nanoparticles on Human Blood Lymphocytes. B*iological Trace Element Research*, vol. 184, pp. 350–357. https://doi.org/10.1007/s12011-017-1170-4
10. Naz S., Gul A., Zia M. 2020, Toxicity of copper oxide nanoparticles: a review study. *IET Nanobiotechnology*, vol. 14, issue 1, pp. 1–13. https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2019.0176
11. Chen F.-Ch., Huang C.-M., Yu X. W., Chen Ya. Yu. 2022, Effect of nano zinc oxide on proliferation and toxicity of human gingival cells. *Human & Experimental Toxicology*, vol. 41, pp. 1–10. https://doi.org/10.1177/09603271221080237
12. Pashkevich M. A., Danilov A. S. 2023, Ecological security and sustainability. *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], vol. 260, pp. 153–154. (*In Russ*.)
13. Shevko E. P., Gora M. P., Kokhanova S. P., Panin G. L. 2023, The Formation of the Composition of Thermal Waters of Present-Day Volcanoes Based on the Example of the Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kuril Islands. *Russian Journal of Pacific Geology*, vol. 17, no. 1, pp. 90–100. https://doi.org/10.1134/S1819714023010098
14. Rahman M. M., Hasan M. F., Hasan A. S. M. M., Alam M. S., Biswas P. K., Zaman M. N. 2021, Chemical weathering, provenance, and tectonic setting inferred from recently deposited sediments of Dharla River, Bangladesh. *Journal of Sedimentary Environments*, vol. 6, pp. 73–91. https://doi.org/10.1007/s43217-020-00046-z
15. Makovozova Z. E., Sokolov A. A., Fomenko V.A., Sarbaeva M. T. 2023, The influence of hydrogeological features of the Unalsky tailings dam on ecosystem pollution by heavy metals. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 6, pp. 126–138. (*In Russ*.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_126
16. Antoninova N. Yu., Sobenin A. V., Usmanov A. I., Gorbunov A. A. 2024, Substantiation of the possibility of using waste from the production of humic preparations for wastewater treatment from metals (Cd^{2+}, Zn^{2+}, Mg^{2+}, Cu^{2+}) in order to develop effective measures for environmental rehabilitation. *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], vol. 267, pp. 421–432. (*In Russ*.) https://elibrary.ru/NYTBJH
17. Mohd Yatim S. R., Kasmuri S. N. H., Syahjidan H. N., Mokhtar N. S., Zainuddin N. A. 2020, Removing copper, chromium and nickel in industrial effluent using hydroxide precipitation versus sulphide precipitation. *Health Scope*, vol. 3, no. 3, pp. 54–60.
18. Benalia M. C., Youcef L., Bouaziz M. G., Achour S., Menasra H. 2022, Removal of heavy metals from industrial wastewater by chemical precipitation: Mechanisms and sludge characterization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, pp. 5587–5599. https://doi.org/10.1007/s13369-021-05525-7
19. Mulungulungu G. A., Mao T., Han K. 2021, Efficient removal of high-concentration copper ions from wastewater via 2D g-C_3N_4 photocatalytic membrane filtration. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 623, article number 126714. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126714
20. Xiang H., Min X., Tang Ch.-J., Sillanpää M., Zhao F. 2022, Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review. *Journal of Water Process Engineering*, vol. 49, no. 6, article number 103023. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103023
21. Xiao Yu. D., Jin H. X., Wang M. L., Guo Yu. L. 2022, Collaborative Utilization Status of Red Mud and Phosphogypsum: A Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 8, pp. 1422–1434. https://doi.org/10.1007/s40831-022-00569-x
22. Fomenko A. I., Sokolov L. I. 2022, Application of evils of thermal power plants for wastewater treatment. *Ecologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], vol. 26, no. 1, pp. 14–18. (*In Russ*.) https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-1-14-18
23. Da Silva J. M., Freire J. M. A., Taniguchi C. A. K., Diógenes I. C. N., Becker H., Longhinotti E. 2024, Blast furnace sludge loaded with phosphate: a potential low-cost fertilizer. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 26, pp. 392–399. https://doi.org/10.1007/s10163-023-01836-z
24. Vlasenko V. P., Osipov A. V., Kostenko V. V. 2019, Composition and properties of serpentinite rock and the possibility of using it as a soil ameliorant. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Herald], no. 4, pp. 28–31. (*In Russ*.) https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10054; https://elibrary.ru/TFOQDK
25. Nekrasov R. V., Akanova N. I., Sheujen A. Kh., Vizirskaya M. M. 2019, Prospects of using phosphogypsum as a chemical meliorant in agriculture of the Russian Federation. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal* [International Agricultural Journal], no. 6, pp. 93–97. (*In Russ*.) https://doi.org/10.24411/2587-6740-2019-16115; https://elibrary.ru/HACJOD
26. Souza S. C. R., Souza L. A., Schiavinato M. A., de Oliveira Silva F. M., de Andrade S. A. L. 2020, Zinc toxicity in seedlings of three trees from the Fabaceae associated with arbuscular mycorrhizal fungi. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 195, article number 110450. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110450
27. Jung A., Kim S.-H., Yang J.-Y., Jeong J., Lee J. K., Oh J.-H., Lee J. H. 2021, Effect of Pulmonary Inflammation by Surface Functionalization of Zinc Oxide Nanoparticles. *Toxics*, vol. 9, issue 12, pp. 1–10, article number 336. https://doi.org/10.3390/toxics9120336
28. Zulfiqar U., Ayub A., Hussain S., Waraich E. A., El-Esawi M. A., Ishfaq M., Ahmad M., Ali N., Maqsood M. F. 2022, Cadmium Toxicity in Plants: Recent Progress on Morpho-physiological Effects and Remediation Strategies. *Journal of Soil Science and Plant Nutricion*, vol. 22, pp. 212–269. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00645-3
29. Zhao H., Guan J., Liang Q., Zhang X., Hu H., Zhang J. 2021, Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of sassafras seedlings. *Scientific Reports*, vol. 11, article number 9913. https://doi.org/10.1038/s41598-021-89322-0
30. Zhang Z., Peng R., Xia X., Liu P., Chen S., Xia R., Jiang X., Jiang M., Lin J. 2023, Effects of iron on the growth, chlorophyll*a*, total lipids, and fatty acids of Chaetoceros lorenzianus. *Journal of Applied Phycology*, vol. 35, pp. 639–647. https://doi.org/10.1007/s10811-023-02912-5
31. Aqeel M., Khalid N., Tufail A., Ahmad R. Z., Akhter M. S., Luqman M., Javed M. T., Irshad M. K., Alamri S., Hashem M., Noman A. 2021, Elucidating the distinct interactive impact of cadmium and nickel on growth, photosynthesis, metal-homeostasis, and yield responses of mung bean (*Vigna radiata* L.) varieties. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, pp. 27376–27390. https://doi.org/10.1007/s11356-021-12579-5
32. Zhurova V. G., Svetlichnaya M. S. 2018, Study of the effect of potassium, calcium and magnesium ions on plant growth and development. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya* [Achievements of science and education], no. 14(36), pp. 13–15. (*In Russ*.)
33. Akanova N. I., Kozlova A. V., Mukhina M. T. 2021, The role of magnesium in the plant nutrition system. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Herald], no. 6, pp. 66–72. (*In Russ*.) https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-6-014

The article was received on July 23, 2025