

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНО-  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**  
**THEORETICAL FOUNDATIONS OF THE DESIGN OF MINING SYSTEMS**

Научная статья

УДК 622.268:504.06

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-146-160

**РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ОТХОДОВ ГОРНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА И КИСЛЫХ СТОЧНЫХ ВОД В КАЧЕСТВЕ  
ПРИРОДОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Антонинова Наталья Юрьевна, Собенин Артем Вячеславович\*,  
Усманов Альберт Исмагилович, Кузнецова Ярослава Артемовна

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН)

\* для корреспонденции: [arsob@yandex.ru](mailto:arsob@yandex.ru)



**Информация о статье**

Поступила:

23 июля 2025 г.

Одобрена после  
рецензирования:

15 января 2026 г.

Принята к публикации:

12 февраля 2026 г.

Опубликована:

19 марта 2026 г.

**Ключевые слова:**

Тяжелые металлы, сточные воды, мелиоранты, отходы производств, горнотехническая система, биотестирование, магний, медноколчеданные месторождения

**Аннотация.**

Настоящее исследование посвящено актуальной проблеме повышения устойчивого функционирования и развития горнотехнических систем (ГТС). Работа демонстрирует высокий потенциал применения отходов горнодобывающей деятельности в качестве ключевых компонентов для создания природоподобных мелиорантов. Основной целью являлось экспериментальное обоснование и определение наиболее эффективных комбинаций мелиоративных субстратов на основе техногенных продуктов и типов полива для разработки технологии восстановления деградированных почвенных покровов. Исследование проводилось в лабораторных условиях на двух тестовых культурах, обладающих различной физиологией и чувствительностью к условиям произрастания: кресс-салате (*Lepidium sativum* L.) и сое (*Glycine max* (L.) Merr.). В качестве экспериментальных субстратов использовались варианты смесей на основе природной почвы, гуминового мелиоранта (ГМ) и ферро-магниевого мелиоранта (ФММ). Для полива применялись дистиллированная вода и так называемая «магниева вода», обогащенная ионами магния. Полученные результаты выявили выраженную видовую специфичность отклика растений на применяемые мелиоративные воздействия. Для кресс-салата была установлена максимальная эффективность субстрата, состоящего из комбинации почвы и гуминового мелиоранта, при использовании дистиллированной воды для полива. Данный режим обеспечил не только 100% всхожести семян, но и способствовал значительному развитию корневой системы, что является важным фактором для укрепления грунта на склонах отвалов. В противоположность этому, для сои наиболее благоприятные условия роста были достигнуты при использовании природной почвы без добавления мелиорантов, но с поливом магниево-водой. Исследование показывает, что отходы горнодобывающей промышленности благодаря переработке в мелиоранты, могут внести значительный вклад в развитие горнотехнической системы, обеспечивая экономические, экологические и социальные выгоды.

**Для цитирования:** Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Усманов А.И., Кузнецова Я.А. Разработка подходов к использованию отходов горного производства и кислых сточных вод в качестве

природоподобных материалов для повышения устойчивости функционирования горнотехнических систем // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 1 (173). С. 146-160. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-146-160, EDN: GGRDZP

### **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.*

### **Введение**

На протяжении четырех столетий Урал является одним из основных регионов России по добыче полезных ископаемых, что положительно сказывается на экономике страны. Однако эта деятельность сопровождается значительными экологическими проблемами, которые требуют внимательного изучения и разработки мер по их устранению [1].

Современная горнодобывающая промышленность сталкивается с рядом экологических вызовов, обусловленных особенностями функционирования горнотехнических систем (ГТС) [2, 3]. Одной из ключевых проблем является наличие сульфидных минералов в составе пород, которые при контакте с атмосферными осадками подвергаются окислению, приводящему к образованию кислых сточных вод с высоким содержанием тяжелых металлов [4] и представляют серьезную угрозу для водных и почвенных экосистем, оказывая кумулятивный эффект на флору и фауну [5].

Анализ современного состояния минерально-сырьевой базы свидетельствует о неуклонном сокращении запасов высокорентабельных месторождений [2]. В сложившихся условиях горнодобывающие предприятия вынуждены вовлекать в разработку обедненные руды, что закономерно приводит к увеличению объемов образующихся отходов горного производства и, как следствие, к возрастанию экологической нагрузки на прилегающие территории [2, 6]. Таким образом, традиционные подходы к проектированию и эксплуатации горнотехнических систем (ГТС), ориентированные преимущественно на экономическую эффективность, оказываются недостаточными для обеспечения устойчивого развития горнодобывающих регионов.

Для обеспечения экологической безопасности и устойчивого функционирования ГТС при отработке медноколчеданных месторождений необходим переход к новым подходам проектирования, основанным на интеграции экологических принципов на всех этапах жизненного цикла горного предприятия. Ключевым направлением является разработка и внедрение технологий, направленных на минимизацию образования и повторное использование отходов, сточных вод и других промышленных материалов, образующихся в

процессе добычи и переработки руд, в хозяйственных целях [6, 7, 8].

Целью данной работы является разработка подходов к использованию отходов горного производства и кислых сточных вод в качестве природоподобных материалов для создания композиции мелиорантов. Идея исследования заключается в создании композиции мелиорантов на основе отходов горного производства. Подбор компонентов позволит не только нейтрализовать кислотность, но и закрепить тяжелые металлы в устойчивых формах, снижая их миграционную активность. Внедрение таких природоподобных решений способствует замкнутости производственного цикла ГТС, уменьшая объемы складированных отходов и снижая нагрузку на окружающую среду.

### **Материалы и методы**

*Исходное сырье для получения мелиорантов.*

#### *Отходы железо-магниевого производства*

Отходы железо-магниевого производства представляют собой пастообразную субстанцию красно-коричневой окраски. Элементный состав характеризуется повышенным содержанием магния (Mg), меди (Cu) и железа (Fe). Данный вид отходов является результатом технологического процесса переработки серпентинитового сырья, направленного на извлечение оксида магния (MgO) [9].

#### *Отходы гуминовых препаратов*

Отходы производства гуминовых препаратов (ОГП). В рамках настоящего исследования анализируется состав и свойства отходов, генерируемых в процессе промышленного синтеза гуминовых препаратов. Технологическая схема производства предусматривает использование композиции исходных компонентов. В качестве основных компонентов используются: верховой торф, сапропель, диатомит и гидроксид калия [10].

ОГП представляют собой пастообразное вещество темного серого цвета, образующееся в результате разделения твердой фазы от целевого продукта с использованием центрифугирования. В процессе центрифугирования происходит разделение компонентов смеси на твердую и жидкую фазу под действием центробежных сил. Твердая фаза, являющаяся ценным источником питательных веществ и представляющая собой

отход производства, извлекается для последующего использования [10].

#### *Сточные воды*

Сточные воды, рассматриваемые в работе, представляют собой воды, образующиеся на отработанном медноколчеданном месторождении Кабан-1, расположенном в Свердловской области, приблизительно в 190 км от Екатеринбурга. Исходный состав этих вод характеризуется наличием следующих элементов в указанных концентрациях (мг/л): Cu – 78,10; Mg – 322,50; Fe – 147,71; Zn – 50,12; Cd – 0,2 [9]. После проведения первого этапа обработки с использованием отходов железо-магниевого производства содержание этих же элементов изменяется следующим образом (мг/л): Cu – 0,1; Mg – 849,60; Fe – <0,0073; Zn – 0,2; Cd – 0,01 [9]. На втором этапе, после взаимодействия с отходами ОГП, концентрации составляют (мг/л): Cu – <0,0012; Mg – 931,10; Fe – <0,0073; Zn – <0,0016; Cd – <0,0015 [10].

#### *Способ получения мелиорантов*

Для получения ферро-магниевого мелиоранта (ФММ) отходы железо-магниевого производства (ЖМКС) смешивают со сточными водами (дозировка ЖМКС – 10 г/л, концентрация р-ра ≤500 мг/л Cu, Zn, Cd) время контакта при этом составляет 2-3 часа, обеспечивая очистку воды от тяжелых металлов от 75 до 99%. После этого отработанный материал сушат до влажности 10%, а затем гранулируют, получая готовый ФММ [9].

Для производства гуминового мелиоранта (ГМ) отходы гуминовых препаратов (ОГП) аналогично смешивают со сточными водами после первого этапа (дозировка ОГП – 10 г/л, концентрация р-ра ≤50 мг/л Cu, Zn), и также контактируют 2-3 часа, обеспечивая очистку воды от тяжелых металлов 99,99%. Отработанный материал сушат до 10% влажности и гранулируют, получая ГМ [10].

Полученная после двух этапов очистки вода с высоким содержанием магния (Mg) используется для орошения и полива.

#### *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. Пользовали сочетание азотной и плавиковой кислот для разложения проб.

Для анализа содержания ионов металлов в образцах использовался метод атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). Этот метод применялся в сочетании с воздушно-ацетиленовым пламенем с использованием спектрофотометра Varian AA 240 FS, (Varian Australia Pty Ltd, Австралия).

#### *Эксперимент*

##### *Биотестирования сточных вод*

В эксперименте по проращиванию семян кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) и сои (*Glycine max* (L.) Merr.) была использована методика, описанная в приложении 10 к СанПин 2.1.7.573-96. В чашки Петри было помещено по 30 семян каждого вида растений, которые были равномерно распределены на фильтровальной бумаге. Затем в каждую чашку добавляли 5 мл сточных вод, полученных после взаимодействия с отходами, а также использовали сточную воду с месторождения Кабан-1 и дистиллированную воду в качестве контроля. Чашки были закрыты крышками и выдержаны в течение 72 часов при комнатной температуре [10].

##### *Влияние различных субстратов на рост и развитие кресс-салата и сои*

В чашки Петри помещались 4 различных субстрата: «почва», «почва+ФММ», «почв+ГМ», «почва+ФММ+ГМ». В каждую чашку Петри было помещено по 30 штук семян сои и кресс-салата. Далее изучаемые материалы были продублированы на две группы: в первой поливали дистиллированной водой, а во второй – сточной водой («магниева вода»), полученной после двухэтапной очистки. Дозировка отходов была 60 гр на 1м<sup>2</sup>. Образцы поливали один раз вначале эксперимента. Эксперимент продлился 14 дней.

##### *Морфометрические показатели*

По завершении всех экспериментов проводили измерение длины корней и определение процентного соотношения проросших семян, а также исследование содержания изучаемых химических элементов в растениях. В результате были рассчитаны значения относительной всхожести семян (RGP) и относительного роста корней (RRG):

$$RGP (\%) = (Gs / Gc) * 100 \quad (1)$$

где Gs – это количество проросших семян в пробе, а Gc – количество проросших семян в контрольной группе (дистиллированная вода).

$$RRG (\%) = (Ls / Lc) * 100 \quad (2)$$

где Ls – длина корня проросшего семени в пробе, а Lc – длина корня проросшего семени в контрольной группе (дистиллированная вода).

##### **Результаты и их обсуждение**

Горнотехнические системы, задействованные в разработке медноколчеданных месторождений, характеризуются специфическими экологическими рисками, связанными с геохимическими процессами окисления сульфидов [4, 11, 12]. Образующиеся в результате кислые дренажные воды содержат высокие концентрации токсичных металлов (Cu, Zn, Fe, Cd и др.), что приводит к долгосрочному загрязнению почв и водных объектов [13, 14].

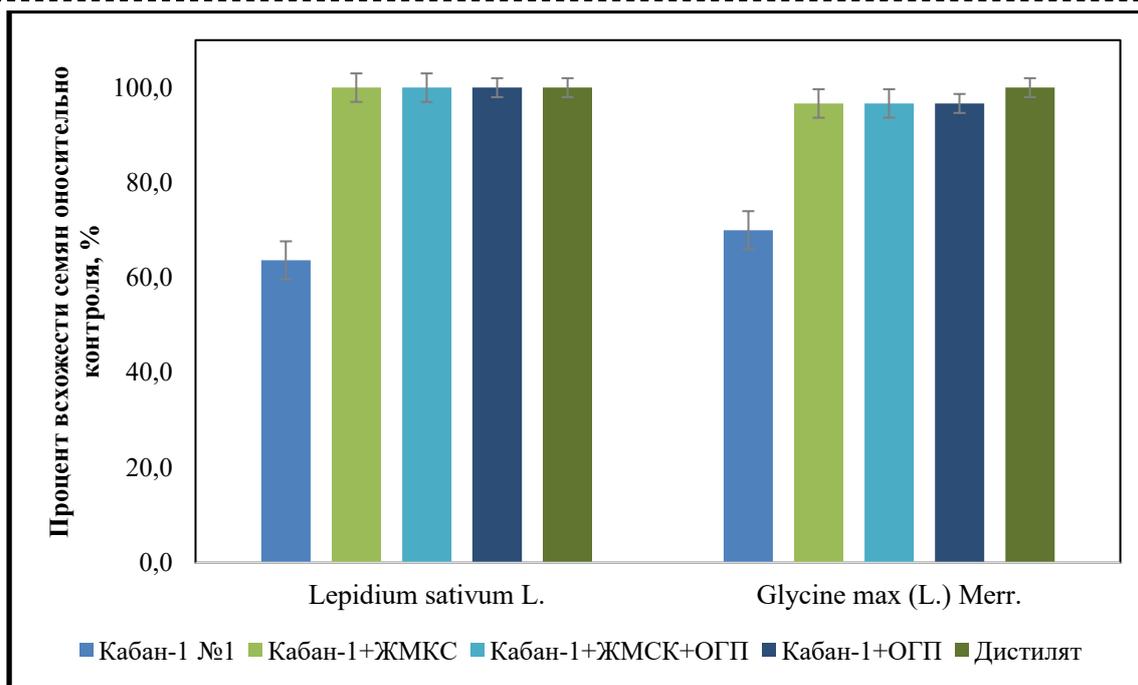


Рис. 1. Влияние состава сточных вод на всхожесть семян кресс-салата (*Lepidium sativum L.*) и сои (*Glycine max (L.) Merr.*), оцениваемую по показателю RGP

Fig. 1. Influence of wastewater composition on the germination of watercress (*Lepidium sativum L.*) and soybean (*Glycine max (L.) Merr.*) seeds, evaluated by the RGP indicator

Традиционные методы очистки, такие как нейтрализация известью и фильтрация, зачастую требуют значительных финансовых затрат и не обеспечивают полного устранения экологических последствий, особенно в долгосрочной перспективе [15, 16, 17]. Кроме того, они не решают проблему утилизации образующихся отходов, содержащих тяжелые металлы [18, 19, 20].

В условиях истощения богатых рудных залежей и перехода к переработке обедненного сырья объемы отходов горного производства возрастают, что усугубляет проблему утилизации [2, 21, 22]. Вместе с тем отвалы породы могут рассматриваться как потенциальный ресурс для вторичного использования [23]. Одним из перспективных направлений является их применение в составе мелиорантов – материалов, улучшающих свойства нарушенных почв и способствующих их биологической реабилитации [24].

Создание композиций мелиорантов на основе отходов горного производства требует комплексного подхода, учитывающего не только их химический состав, но и потенциальное влияние на экосистемы. Ключевым аспектом является изучение взаимосвязи между элементами горнотехнической системы (ГТС) и окружающей средой, поскольку внедрение новых материалов должно быть экологически безопасным и способствовать восстановлению нарушенных земель [25].

#### Биотестирование сточных вод

Для оценки реакции экосистемы на предлагаемые мелиоранты необходимо проведение биотестирования – метода, позволяющего определить токсичность очищенных сточных вод, отработанных сорбентов и осадков, образующихся в процессе очистки. В качестве тест-объектов были использованы растения, такие как кресс-салат (*Lepidium sativum L.*), и соя (*Glycine max (L.) Merr.*), поскольку они обладают высокой чувствительностью к загрязнению тяжелыми металлами и к другим токсичным веществам [10].

В исследовании был проведен эксперимент, в ходе которого растения кресс-салата выращивались в сточной воде после предварительной очистки [9, 10]. По результатам исследования сделаны выводы о влиянии сточных вод на рост и развитие растений, что позволяет оценить качество воды.

Биотестирование позволяет оценить не только физико-химические показатели воды, но и ее влияние на живые организмы, что делает этот метод более полным и информативным для определения подходящего качества воды [26, 27]. Кроме того, использование биотестирования помогает улучшить контроль качества воды и обеспечить ее безопасность для окружающей среды и человека [28, 29].

В ходе экспериментальных исследований было обнаружено, что воздействие

необработанной сточной воды с отработанного медноколчеданного месторождения «Кабан-1» оказывает отрицательное влияние на прорастание семян кресс-салата. Сравнительный анализ значений прорастания и общей биомассы показал значительное снижение этих параметров по сравнению с контрольными значениями.

Таблица 1 и Рис. 1 наглядно демонстрируют различия в развитии семян под воздействием сточной воды из исследуемого месторождения. Эти результаты являются важным показателем

токсичности среды и могут быть использованы для оценки возможных последствий загрязнения водных ресурсов.

Проведенные исследования показали, что сточная вода с месторождения «Кабан-1» имеет серьезное негативное воздействие на развитие растений кресс-салат и сои, что вызывает обеспокоенность относительно ее потенциальной токсичности для живых организмов в целом. Однако обнаружено, что обработка сточной воды после взаимодействия с отходами производств

Таблица 1. Оценка влияния состава сточных вод на показатели роста *Lepidium sativum* L. и *Glycine max* (L.) Merr. посредством анализа всхожести, роста и элементного состава растений.

Table 1. Evaluation of the effect of wastewater composition on the growth indicators of *Lepidium sativum* L. and *Glycine max* (L.) Merr. by analyzing the germination, growth, and elemental composition of the plants.

№	Название	Исходная сточная вода, отобранная с месторождения Кабан-1, не подвергавшаяся предварительной обработке.		Сточная вода с месторождения Кабан-1 после обработки отходом железо-магниевого производства (ЖМКС) при дозировке 10 г/л.		Сточная вода с месторождения Кабан-1, последовательно обработанная отходом железо-магниевого производства (ЖМКС) и отходом гуминового производства (ОГП), при дозировках 10 г/л для каждого отхода.		Сточная вода с месторождения Кабан-1, подвергнутая обработке отходом гуминового производства (ОГП) при концентрации отхода 10 г/л.		Дист. вода (контрольный образец)	
		Кресс-салат	Соя	Кресс-салат	Соя	Кресс-салат	Соя	Кресс-салат	Соя	Кресс-салат	Соя
1	Кол-во проросших семян, шт	19,00±2,0 0	21,00±2,0 0	30,00±0,0 0	29,00±2,0 00	30,00±0,0 00	29,00±1,0 00	30,00±0,0 0	29,00±2,0 0	30,00±0,0 0	30,00±0,0 0
2	Длина подземной части, мм	4,30±4,00	-	9,64±2,65	-	21,01±6,00	-	21,45±5,55	-	21,06±1,53	-
3	Длина надземной части, мм	5,31±5,16	20,00±2,15	13,60±6,14	32,70±2,87	21,01±6,00	21,00±3,69	14,12±4,33	21,15±3,74	14,74±3,04	28,77±1,10
5	Общая биомасса, мг	15,00±2,89	1,11±0,10	27,15±4,04	1,21±0,15	416,00±25,45	1,20±0,15	40,00±3,76	1,09±0,10	45,66±1,15	1,10±0,10
6	RGP, % (процент прорастания)	63,33±2,00	70,00±3,11	100,00±0,00	96,67±1,16	100,00±0,00	96,67±1,28	100,00±0,00	96,67±1,00	100,00±0,00	100,00±0,00
7	RGG, % (относительная длина корней)	20,50±4,00	-	45,74±2,65	-	100,50±6,00	-	103,50±7,50	-	100,00±1,53	-

Таблица 2. Эффекты различных субстратов на всхожесть семян, длину побегов и элементный состав *Lepidium sativum* L.Table 2. Effects of different substrates on seed germination, shoot length, and elemental composition of *Lepidium sativum* L.

№	Название	Не модифицированная почва (контрольный образец)		Почва, модифицированная добавлением ФММ		Почва, модифицированная добавлением ФММ и ГМ		Почва, модифицированная добавлением ГМ	
		Магниева вода	Лист. вода	Магниева вода	Лист. вода	Магниева вода	Лист. вода	Магниева вода	Лист. вода
1	Кол-во проросших семян, шт.	30,00±0,00	30,00±0,00	30,00±0,00	30,00±0,00	30,00±0,00	28,00±1,73	26,00±1,52	30,00±0,00
2	Длина подземной части, мм	27,53±11,21	29,06±14,55	27,00±10,82	30,78±7,72	17,62±10,08	31,11±11,36	21,08±14,37	35,55±7,22
3	Длина надземной части, мм	53,52±17,78	59,00±10,47	54,33±14,69	64,42±14,00	53,83±16,41	61,16±16,88	42,00±15,84	64,50±10,14
5	Сухая биомасса, мг	40,00±2,00	30,00±1,00	40,00±2,00	40,00±2,00	40,00±5,00	40,00±2,00	30,00±1,00	40,00±3,00
6	RGF, % (процент прорастания)	100,00±0,00	100,00±0,00	100,00±0,00	100,00±0,00	100,00±0,00	93,33±6,07	86,67±5,00	100,00±0,00
7	RGG, % (относительная длина корней)	93,32±23,27	100,00±0,00	93,35±22,22	99,32±15,89	56,89±24,13	100,36±17,31	79,01±27,41	114,68±14,97
8	С <sub>д</sub> , мг/кг	10,00±1,00	10,82±1,50	15,44±2,40	33,08±5,45	15,38±2,30	23,08±4,50	5,38±0,86	17,69±2,90
9	Zn, мг/кг	61,54±8,07	100,00±10,00	53,85±6,45	130,77±9,50	76,92±7,50	123,08±12,00	38,46±3,90	130,77±12,70
10	С <sub>д</sub> , мг/кг	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015
11	Fe, мг/кг	923,08±93,45	1286,15±105,00	1410,77±125,00	724,66±89,30	1242,31±110,10	385,38±39,45	966,15±98,00	407,69±56,00
12	Mg, мг/кг	5053,85±440,00	4161,54±330,00	7230,77±1680,00	7607,69±1500,00	9753,85±1750,00	7323,08±1350,00	4284,62±970,00	6161,54±1000,00
13	K, мг/кг	52661,54±7500,00	55338,46±7700,00	19630,77±2500,00	117307,69±12000,00	127707,69±12500,00	50007,69±5600,00	126536,46±10000,00	74323,08±8300,00

Таблица 3. Эффекты различных субстратов на всхожесть семян, длину побегов и элементный состав *Glycine max (L.)*.Table 3. Effects of different substrates on seed germination, shoot length, and elemental composition of *Glycine max (L.)*.

№	Название	Не модифицированная почва (контрольный образец)		Почва, модифицированная добавлением ФММ		Почва, модифицированная добавлением ФММ и ГМ		Почва, модифицированная добавлением ГМ	
		Магниева вода	Чист. вода	Магниева вода	Чист. вода	Магниева вода	Чист. вода	Магниева вода	Чист. вода
1	Кол-во проросших семян, шт.	27,00±1,92	30,00±0,00	28,00±1,73	30,00±0,00	30,00±0,00	28,00±1,73	29,00±1,53	30,00±0,00
2	Длина подземной части, мм	88,00±10,98	96,00±13,58	46,25±27,61	52,5±28,55	39,44±27,02	77,28±28,35	41,67±18,87	82,33±59,32
3	Длина надземной части, мм	121,10±17,04	133,50±22,14	51,25±21,95	90,00±34,54	43,44±26,97	111,75±55,66	50,00±39,05	180,66±90,05
5	Сухая биомасса, мг	630,00±54,00	928,00±79,00	690,00±55,00	1030,00±90,00	1180,00±95,00	800,00±82,00	800,00±85,00	960,00±87,00
6	RCR, % (прорастания)	90,00±1,92	100,00±0,00	93,33±5,77	100,00±0,00	100±0,00	93,33±5,77	96,67±5,09	100,00±0,00
7	RCG, % (относительная длина корней)	90,71±15,45	100,00±0,00	48,18±19,76	54,69±30,31	44,27±39,14	66,96±27,74	43,40±21,44	59,32±24,05
8	Cu, мг/кг	13,75±1,25	11,00±1,10	12,25±1,15	9,75±1,05	17,50±1,60	13,25±1,20	11,25±1,15	12,00±1,15
9	Zn, мг/кг	45,00±6,75	27,50±3,45	135,00±9,15	37,50±3,99	25,00±3,15	35,00±3,85	20,00±3,00	40,00±6,00
10	Cd, мг/кг	< 0,0015	< 0,0015	0,25±0,10	0,25±0,10	< 0,0015	0,25±0,10	0,50±0,10	0,25±0,10
11	Fe, мг/кг	307,25±34,55	455,00±39,15	161,50±15,00	220,50±18,10	277,00±30,00	362,00±35,55	185,75±16,00	295,00±12,00
12	Mg, мг/кг	4710,00±550,00	3852,50±405,00	5925,00±590,00	4582,50±420,10	4305,02±460,90	5037,55±540,00	3910,00±400,00	4387,54±420,10
13	K, мг/кг	56277,00±6500,00	67912,50±6600,00	59780,00±5400,00	51220,50±6500,00	45927,55±5010,00	59502,50±5250,00	62722,50±5945,00	79620,12±6325,00

может значительно улучшить ее эффективность и сделать ее более безопасной для окружающей среды. Отмечаются высокая всхожесть семян у обоих исследуемых видов растений, при этом значения показателя RGP, % при обработке сточных вод отходами варьировали от 96,7 до 100%. Составы, которые включали обработанную отходами сточную воду, показали значительно более высокий процент проросших семян и отсутствие негативного воздействия на жизнеспособность растений. Это говорит о том, что процесс обработки сточной воды отходами может быть эффективным способом улучшения ее качества и снижения ее вредного воздействия на окружающую среду.

Из графика на Рис. 2 видно, что субстраты по-разному влияют на рост растений, так, наибольшая длина надземной части растений кресс-салат зафиксирована в образцах с добавлением к отходам гуминовых препаратов (ОГП) и составила 21,1 мм, а для особой растений соя сточная вода с добавлением отходов железо-магниевого производства отмечена как наиболее эффективная, длина особой сои составила 32,7 мм.

Использование отходов горного производства для обработки кислых сточных вод медно-колчеданных месторождений представляет собой перспективный природоподобный подход к повышению устойчивости горнотехнических систем. Этот метод позволяет одновременно улучшить качество воды, снижая ее токсичность, и утилизировать отходы, минимизируя экологический ущерб. Внедрение таких подходов способствует развитию круговой экономики и устойчивому управлению ресурсами в горнодобывающей промышленности.

*Влияние различных субстратов на рост и развитие кресс-салата и сои*

Горнодобывающая промышленность играет ключевую роль в обеспечении сырьевой базы для различных отраслей экономики. Однако при освоении медноколчеданных месторождений образуются значительные объемы отходов, требующие эффективных решений для их утилизации и вторичного использования. Одним из перспективных направлений является разработка подходов к применению этих отходов в качестве природоподобных материалов, способствующих повышению устойчивости ГТС [30].

Вторичное использование отходов горного производства позволяет не только снизить экологическую нагрузку, но и создать экономически выгодные решения при проектировании ГТС. Природоподобные материалы, полученные из отходов, могут улучшать физико-механические характеристики

грунтов, повышая их устойчивость к эрозии и деформациям [31, 32, 33].

Важным аспектом является изучение миграции тяжелых металлов в системе «отход – окружающая среда». Разработка методов контроля их миграции позволяет минимизировать негативное воздействие на экосистемы и здоровье человека [34, 35, 36]. В рамках экспериментальных исследований оценивалась эффективность использования мелиорированных субстратов на основе отходов производства (Таблицы 2, 3). Проводился сравнительный морфометрический анализ растений, выращенных на модифицированных и традиционных субстратах, а также изучалось влияние доочищенной сточной воды (магниево-водной) на рост кресс-салата и сои. Образцы разделялись на две группы: полив магниевой водой и дистиллированной водой для оценки фито-токсичности и адаптационного потенциала растений.

Исследование, результаты которого визуализированы на Рис. 3 и представлены в Таблицах 2-3, оценивало воздействие полива магниевой и дистиллированной водой на прорастание семян кресс-салата и сои. Растения выращивались на субстратах, содержащих мелиоранты, полученные из промышленных отходов. Анализ всхожести кресс-салата показал, что при использовании магниевой воды этот показатель находился в диапазоне 86,67%-100,00%, в то время как при поливе дистиллированной водой – 93,33%-100,00%. Для сои результаты были схожи с показателями от 90,00% до 96,67% для магниевой воды и от 93,33% до 100,00% для дистиллированной воды.

Относительная длина корней RGG также отличалась в зависимости от типа воды, используемой для полива. Для кресс-салата относительная длина корней составляла от 56,89% до 93,35% при использовании магниевой воды и от 99,32% до 114,68% при использовании дистиллированной воды. Для сои этот показатель составлял от 43,40% до 90,71% при поливе магниевой водой и от 54,69% до 100% при поливе дистиллированной водой.

В ходе исследований было выявлено, что наиболее благоприятные условия для кресс-салата создает смесь почвы и гуминового мелиоранта (ГМ) при поливе дистиллированной водой. Этот состав способствует полному прорастанию семян (100%) и значительному развитию корневой системы (относительная длина корней 114,68%) благодаря тому, что мелиорант ГМ обогащает почву питательными веществами, а дистиллированная вода обеспечивает их равномерное распределение.

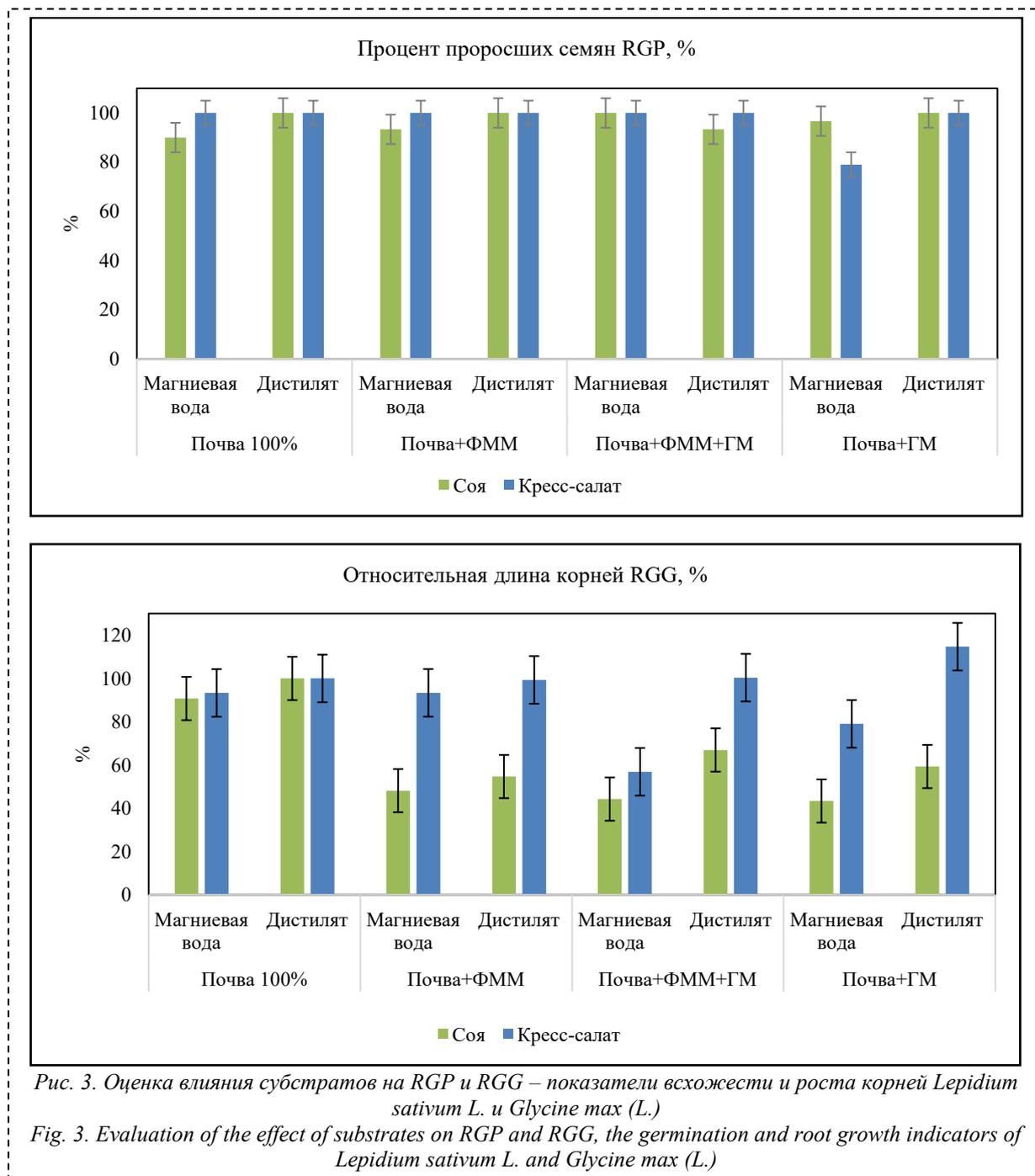
Для выращивания сои оптимальным решением оказалось использование обычной

почвы (100%), при этом полив осуществлялся магниевой водой. Такой простой способ обеспечивает растения важным для их развития магнием, который, в свою очередь, способствует усвоению других питательных веществ и укрепляет корни [18, 19]. Результаты были следующие: всхожесть семян 90%, относительная длина корней – 90,71%.

Помимо оптимального варианта, хорошие показатели роста кресс-салата были зафиксированы в образцах, выращенных на субстратах «Почва+ФММ+ГМ» и «Почва+ФММ» при поливе дистиллированной водой. Для них процент прорастания (RGP)

составил 93,33% и 100%, а относительная длина корней (RGG) – 100,36% и 99,32%, соответственно. Важно, что за исключением образца «Почва+ФММ+ГМ» с поливом магниевой водой все прочие субстраты не вызвали отрицательного воздействия на развитие кресс-салата. Что касается сои, ситуация была противоположной: все варианты, кроме «Почва 100%» с поливом магниевой водой, привели к замедлению роста корневой системы в пределах 33-52%.

Таким образом, результаты эксперимента указывают на значительное влияние качества воды и мелиорантов на всхожесть семян и длину



корней растений.

Полученные данные позволяют сделать несколько важных заключений. Во-первых, существенную роль играет наличие магния в растворе – этот элемент, являясь ключевым компонентом хлорофилла и активатором ферментов [37, 38, 39], мог улучшать метаболические процессы у сои, однако его избыток в сочетании с мелиорантами (ФММ, ГМ), вероятно, вызывал ионный дисбаланс [40, 41, 42], особенно для кресс-салата. Во-вторых, различные типы мелиорантов по-разному влияли на свойства субстрата: гуминовый мелиорант (ГМ) явно улучшал рост кресс-салата, вероятнее всего, за счет повышения влагоемкости [43, 44] и доступности питательных веществ [44, 45], в то время как ФММ, возможно, влияют на солевой баланс [40, 41, 42], что негативно сказывается на развитии сои. В-третьих, сравнение дистиллированной и магниевой воды показало, что первая обеспечивает нейтральный фон, позволяя растениям эффективнее усваивать питательные вещества из субстрата без конкуренции с дополнительными ионами, тогда как магниевая вода может быть ‘эффективна на бедных почвах, но требует точного дозирования, для избежания переизбытка солей в почвенном растворе [40, 41, 42]. Эти наблюдения подчеркивают сложность взаимодействия факторов полива и состава субстрата, а также необходимость видового подхода при разработке практических рекомендаций.

В целом результаты исследования подчеркивают необходимость комплексного подхода к управлению отходами производства для повышения эффективности горнотехнических систем. Учет взаимодействия факторов полива и состава субстрата, а также видовых особенностей растений позволяет повысить эффективность рекультивации, фиторемедиации и других технологий, используемых в горнодобывающей промышленности. Применение отходов горного производства в качестве природоподобных материалов является перспективным направлением для повышения устойчивости горнотехнических систем при освоении медноколчеданных месторождений. Данный подход не только способствует решению проблемы утилизации отходов и улучшению экологической обстановки, но и создает предпосылки для экономического роста, обеспечивая замкнутый цикл использования ресурсов.

#### **Заключение**

Проведенные исследования убедительно демонстрируют, что отходы горнодобывающей промышленности, образующиеся при функционировании горнодобывающих

предприятий, обладают значительным потенциалом для использования в качестве природоподобных материалов. Результаты экспериментов с различными субстратами и типами полива показали, что ферро-магниевый мелиорант (ФММ) могут успешно применяться для рекультивации нарушенных земель, однако их эффективность существенно зависит от видовых особенностей растений и условий выращивания.

Для кресс-салата оптимальные результаты были достигнуты при использовании комбинации почвы с гуминовым мелиорантом (ГМ) и поливом дистиллированной водой, что обеспечило 100% всхожесть семян и интенсивное развитие корневой системы. В случае с соей наилучшие показатели продемонстрировал вариант с чистой почвой и поливом магниевой водой (90% всхожесть). Эти данные подчеркивают необходимость дифференцированного подхода при выборе мелиорантов для различных культур, что особенно важно при проектировании рекультивационных мероприятий в составе горнотехнических систем.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для решения комплекса экологических проблем, связанных с проектированием ГТС при освоении медноколчеданных месторождений. Во-первых, использование отходов в качестве мелиорантов позволяет сократить объемы их складирования и снизить нагрузку на окружающую среду. Во-вторых, исследования подтвердили возможность безопасного применения очищенных сточных вод (в частности, магниевой воды) для полива растений, что открывает перспективы для создания замкнутых систем водопользования на горнодобывающих предприятиях.

Особую ценность представляют данные о влиянии различных комбинаций субстратов на рост растений, которые могут быть использованы при проектировании ГТС для оптимизации состава рекультивационных смесей, разработки эффективных схем орошения и создания устойчивых фитоценозов на нарушенных землях.

Перспективным направлением дальнейших исследований является углубленное изучение механизмов взаимодействия различных типов мелиорантов с растениями, а также разработка технологий их направленного модифицирования для повышения эффективности данных мелиорантов. Полученные знания будут способствовать созданию научно обоснованных решений для экологически безопасного освоения месторождений и устойчивого функционирования горнотехнических систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А. Б. [и др.] 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. 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.
4. 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. EDN SBKRCK
5. Иванищев В. В. Биоаккумуляция, гомеостаз и токсичность меди в растениях // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2020. № 1. С. 33-41.
6. Пашкевич М. А., Данилов А. С. Экологическая безопасность и устойчивое развитие // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 153-154.
7. Бурмистров К. В., Осинцев Н. А. Принципы устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 4. С. 179-195. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2606. EDN TZVRAB.
8. Петрова Т. А., Рудзиш Э. Виды мелиорантов для рекультивации техногенно нарушенных территорий горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4. С. 100-112. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-4-0-100.
9. 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<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>) // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 257-265. DOI: 10.31897/PMI.2023.34.
10. 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<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>) с целью разработки эффективных мероприятий по экологической реабилитации // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 421-432. EDN NYTVJH
11. Орехова Н. Н., Стефунько М. С., Гулиева А. Ш. Использование магнийсодержащих материалов при комбинированной геотехнологии для обезвреживания рудничных вод медноколчеданных месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 3. С. 162-175. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-156-169. EDN WEYOEF.
12. Плохов А. С., Харько П. А., Пашкевич М. А. Исследование влияния хвостового хозяйства медноколчеданного месторождения на поверхностные воды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4. С. 57-68. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_4\_0\_57.
13. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Наволокина В. Ю. Реабилитация техногенных объектов, обработанных медноколчеданных месторождений на примере Левихинского рудника (средний Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 8. С. 137-150. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4089.
14. Сафина Н. П., Коровко А. В., Блинов И. А., Анкушева Н. Н., Рассомахин М. А., Филиппова К. А. Минералогические особенности и физико-химические условия образования жильной минерализации южного фланга Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения (Средний Урал) // Минералогия. 2024. № 10(4). С. 75-97. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-4.
15. Hassan M. A., Aftabuddin M., Meena D. K. [et al.] Clean valorization of distillery industry co-product for fish cage aquaculture: a waste-to-wealth approach. // Blue Biotechnology. 2024. Vol. 1. Iss. 18. DOI: 10.1186/s44315-024-00015-5.
16. Zamotaev I. V., Gracheva R. G., Konopliankova Y. V. [et al.] Soil Formation on Sugar Industry Waste in the Central Chernozemic Zone // Eurasian Soil Sc. 2023. Vol. 56. Pp. 1784-1802. DOI: 10.1134/S1064229323601890.
17. Ben Hamed S., Lefi E., Chaieb M. Effect of olive mill waste water on mineral nutrition and growth phenology of *Atriplex halimus* // Acta Physiol Plant. 2023. Vol. 45. Iss. 123. DOI: 10.1007/s11738-023-03606-8.
18. Bouargane B., Laaboubi K., Biyoune M.G., et al. Effective and innovative procedures to use phosphogypsum waste in different application domains: review of the environmental, economic challenges and life cycle assessment // J Mater Cycles Waste Manag. 2023. Vol. 25. P. 1288-1308. DOI: 10.1007/s10163-023-01617-8.
19. Mateo K., Cai M., Héroux M. [et al.] Carbon Sequestration during the Application of Processed Municipal Organic Waste in Agriculture: A Review // Water Air Soil Pollut. 2024. Vol. 235. P. 688. DOI: 10.1007/s11270-024-07482-x.
20. Kolawole I. D., Kolawole G. O., Sanni-manuel B. A. [et al.] Economic impact of waste from food, water, and agriculture in Nigeria: challenges, implications, and applications – a review // Discov Environ. 2024. Vol. 2. P. 51. DOI: 10.1007/s44274-024-00086-6.
21. Антипин Ю. Г., Барановский К. В., Никитин И. В., Соломеин Ю. М. Совершенствование технологии отработки пологих залежей бедных комплексных руд // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 4. С. 376-387. EDN: WWTFU.
22. Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Барановский К. В., Рожков А. А., Никитин И. В. Пути повышения эффективности подземной разработки пологих месторождений бедных комплексных руд // Проблемы недропользования. 2022. № 4(35). С. 33-43. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.033. EDN: CBVDMR.
23. Исаева, Л. Г. Сотрудничество по использованию отходов горно-обоганительной промышленности для получения мелиорантов и применения их при восстановлении нарушенных лесных территорий // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2022. Т. 1. № 2. С. 100-106. DOI: 10.37614/2949-1185.2022.1.2.012. EDN QAPTXH.
24. Петрова Т. А., Рудзиш Э. Виды мелиорантов для рекультивации техногенно нарушенных территорий горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4. С. 100-112.
25. Петрова Т. А., Рудзиш Э. Метод оценки

эффективности мелиорантов при рекультивации нарушенных земель // Вестник Евразийской науки. 2021. Vol. 13. № 6. С. 1-12.

26. Bożym M., Rybak J. In vitro chronic phytotoxicity of heavy metals and metalloids to *Lepidium sativum* (garden cress) // *Ecotoxicology*. 2024. Vol. 33. P. 94-103. DOI: 10.1007/s10646-024-02729-z.

27. Bożym M. Assessment of Phytotoxicity of Landfilled Waste and Foundry Dust Based on The Direct Test // *Bull Environ Contam Toxicol*. 2022. Vol. 109. P. 1095-1105. DOI: 10.1007/s00128-022-03603-6.

28. Alias C., Zerbini I., Abbà A., et al. Ecotoxicity Evaluation of Industrial Waste and Construction Materials: Comparison Between Leachates from Granular Steel Slags and Steel Slags-Containing Concrete Through a Plant-Based Approach // *Bull Environ Contam Toxicol*. 2023. Vol. 111. P. 3. DOI: 10.1007/s00128-023-03764-y.

29. Ceylan F. Effects of composts obtained from hazelnut wastes on the cultivation of pep-per (*Capsicum annuum*) seedlings // *Sci Rep*. 2024. Vol. 14. P. 3019. DOI: 10.1038/s41598-024-53638-4.

30. Petrova T. A., Rudzisha E., Alekseenko A.V. [et al.] Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge // *Minerals*. 2022. Vol. 12. № 376. P. 1-19.

31. Федоренко В. Ф. О концептуальных принципах развития природоподобных технологий, предотвращения деградации сельскохозяйственных земель и повышения плодородия почв // *АгроЭкоИнженерия*. 2024. № 2(119). С. 4-18. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-4-17. EDN: EXJFHB.

32. Benalia M.C., Youcef L., Bouaziz M.G. [et al.] Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater by Chemical Precipitation: Mechanisms and Sludge Characterization // *Arab J Sci Eng*. 2022. Vol. 47. P. 5587-5599. DOI: 10.1007/s13369-021-05525-7.

33. Lu Y. [et al.] Mechanism study of Cu (II) adsorption from acidic wastewater by ultrasonic-modified municipal solid waste incineration fly ash // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.cjche.2023.11.019.

34. Zulfıqar U., Ayub A., Hussain S. [et al.] Cadmium Toxicity in Plants: Recent Progress on Morpho-physiological Effects and Remediation Strategies // *J Soil Sci Plant Nutr*. 2022. Vol. 22. P. 212-269. DOI: 10.1007/s42729-021-00645-3.

35. Zhao H., Guan J., Liang Q. [et al.] Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of saffras seedlings // *Sci Rep*. 2021. Vol. 11. P. 9913. DOI: 10.1038/s41598-021-89322-0.

10.1038/s41598-021-89322-0.

36. Aqeel M., Khalid N., Tufail A. [et al.] Elucidating the distinct interactive impact of cadmium and nickel on growth, photosynthesis, metal-homeostasis, and yield responses of mung bean (*Vigna radiata* L.) varieties // *Environ Sci Pollut Res*. 2021. Vol. 28. P. 27376-27390. DOI: 10.1007/s11356-021-12579-5.

37. 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.

38. Аканова Н. И., Козлова А. В., Мухина М. Т. Роль магния в системе питания растений // *Агрехимический вестник*. 2021. № 6. С. 66-72. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-6-014.

39. Yong, S., Chen, Q., Xu, F. [et al.] Exploring the interplay between angiosperm chlorophyll metabolism and environmental factors // *Planta*. 2024. T. 260. C. 25. DOI: 10.1007/s00425-024-04437-8.

40. Hamzehzadeh H., Abbaspour H., Safipour Afshar A. [et al.] AMF-mediated salinity adaptation in Pistachio plants: photosynthetic efficiency and ionic balance // *Biologia*. 2025. T. 80. C. 1-17. DOI: 10.1007/s11756-024-01810-6.

41. Hussain A. A., Kamran K., Ishaq M. [et al.] Optimization of electroosmotic flow to enhance the removal of contaminants from low-permeable soils // *J Appl Electrochem*. 2023. T. 53. C. 1245-1258. DOI: 10.1007/s10800-023-01845-8.

42. Dalal M., Mansi & Mayandi K. Zoom-in to molecular mechanisms underlying root growth and function under heterogeneous soil environment and abiotic stresses // *Planta*. 2023. T. 258. C. 108. DOI: 10.1007/s00425-023-04262-5.

43. Shen J., Xiao X., Zhong D. [et al.] Potassium humate supplementation improves photo-synthesis and agronomic and yield traits of foxtail millet // *Sci Rep*. 2024. T. 14. C. 9508. DOI: 10.1038/s41598-024-57354-x.

44. Nassar M. A. A., El-Magharby S. S., Ibrahim N. S. [et al.] Productivity and Quality Variations in Sugar Beet Induced by Soil Application of K-Humate and Foliar Application of Biostimulants Under Salinity Condition // *J Soil Sci Plant Nutr*. 2023. T. 23. C. 3872-3887. DOI: 10.1007/s42729-023-01307-2.

45. Zaghoul E. M., Awad E. S., Mohamed I. [et al.] Co-application of organic amendments and natural biostimulants on plants enhances wheat production and defense system under salt-alkali stress // *Sci Rep*. 2024. T. 14. C. 29742. DOI: 10.1038/s41598-024-77651-9.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Антонинова Наталья Юрьевна**, заведующая лабораторией экологии горного производства, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, (620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58), кандидат технических наук, ORCID iD: 0000-0002-8503-639X, e-mail: natal78@list.ru

**Собенин Артем Вячеславович**, научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, (620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58), ORCID iD: 0000-0001-5513-5680, e-mail: arsob@yandex.ru

**Усманов Альберт Исмагилович**, научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, (620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58), ORCID iD: 0000-0002-3650-0467, e-mail: albert3179@mail.ru

**Кузнецова Ярослава Артемовна**, младший научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, (620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58), ORCID ID: 0000-0002-7808-8474, e-mail: yaroslava.brusnitsyna@mail.ru

*Заявленный вклад авторов:*

**Антонинова Наталья Юрьевна** – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

**Собенин Артем Вячеславович** – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

**Усманов Альберт Исмагилович** – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста

**Кузнецова Ярослава Артемовна** – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

# DEVELOPMENT OF APPROACHES TO THE USE OF MINING WASTE AND ACID WASTEWATER AS NATURAL MATERIALS TO INCREASE THE SUSTAINABILITY OF MINING SYSTEMS

Natalia Yu. Antoninova, Artem V. Sobenin\*,  
Albert I. Usmanov, Yaroslav A. Kuznetsova

Institute of Mining UB RAS

\* for correspondence: arsob@yandex.ru



### Article info

Received:  
23 July 2025

Accepted for publication:  
15 January 2026

Accepted:  
12 February 2026

Published:  
19 March 2026

**Keywords:** finite element method, stress-strain state, convergence of roof rocks and soil, soil heaving

### Abstract.

*The study demonstrates the prospects of using mining waste as components of nature-like ameliorants to increase the environmental sustainability of mining engineering systems (GTS). The aim of the work was to determine the most effective combinations of substrates based on meliorants and irrigation types. The studies were conducted using the example of two crops: watercress (*Lepidium sativum* L.) and soybeans (*Glycine max* (L.) Merr.), using various substrates, including soil, humic ameliorant (GM), ferro-magnesium ameliorant (FMM), as well as distilled and "magnesium water" for irrigation. The results showed that the optimal substrate for watercress was a mixture of soil and GM when watered with distilled water, which ensured 100% seed germination and significant root system development. For soybeans, the most favorable condition was the use of clean soil (100%) with magnesium water irrigation. These results emphasize the need for a differentiated approach to the selection of meliorants for different crops, which is critically important when designing reclamation measures as part of the GTS during the development of copper-bearing deposits.*

**For citation:** Antoninova N.Yu., Sobenin A.V., Usmanov A.I., Kuznetsova Ya.A. Development of approaches to the use of mining waste and acid wastewater as natural materials to increase the sustainability of mining systems. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 1(173):146-160. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-146-160, EDN: GGRDZP

### 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.*

### REFERENCES

1. Makarov A.B. [et al.] Technogenic deposits and features of their impact on the natural environment. *News of higher educational institutions. Mining Journal.* 2022; 3:120-129. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-120-129.

2. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A., Solomein Yu.M. Ecogeotechnology of mining of poor ores with the creation of conditions for the associated disposal of mining waste. *Notes of the Mining Institute*. 2023; 260:289-296. DOI: 10.31897/PMI.2023.21.
3. Makovozova Z.E., Sokolov A.A., Fomenko V.A., Sarbaeva M.T. The influence of hydrogeological features of the Unalsky tailings dam on ecosystem pollution by heavy metals. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023; 6:126-138. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-6-0-126.
4. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Yu. Assessment of the effectiveness of acid mine water purification (using the example of copper-crusts mines in the Middle Urals). *Proceedings of the Mining Institute*. 2024; 267:388-401. EDN SBKRCK
5. Ivanishchev V.V. Bioaccumulation, homeostasis and toxicity of copper in plants. *Proceedings of Tula State University. Natural sciences*. 2020; 1:33-41.
6. Pashkevich M.A., Danilov A.S. Environmental safety and sustainable development. *Notes of the Mining Institute*. 2023. 260; 153-154.
7. Burmistrov K.V., Osintsev N.A. Principles of sustainable development of mining engineering systems in transition periods. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2020; 331(4):179-195. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2606. EDN TZVRAB.
8. Petrova T.A., Rudzish E. Types of meliorants for the reclamation of technogenically disturbed mining areas. *Mining information and analytical bulletin*. 2021; 4:100-112. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-4-0-100.
9. Antoninova N.Yu., Sobenin A.V., Usmanov A.I., Shepel K.V. Assessment of the feasibility of using iron-magnesium production waste for wastewater treatment from heavy metals (Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>). *Notes of the Mining Institute*. 2023; 260:257-265. DOI: 10.31897/PMI.2023.34.
10. Antoninova N.Yu., Sobenin A.V., Usmanov A.I., Gorbunov A.A. Substantiation of the possibility of using waste from the production of humic preparations for wastewater treatment from metals (Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>) in order to develop effective measures for environmental rehabilitation. *Notes of the Mining Institute*. 2024; 267:421-432. EDN NYTBJH
11. Orekhova N.N., Stefunko M.S., Guliyeva A.Sh. The use of magnesium-containing materials in combined geotechnology for mine water disposal of copper-crusts deposits. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2021; 3:162-175. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-156-169. EDN WEYOEF.
12. Plokhov A.S., Kharko P.A., Pashkevich M.A. Investigation of the influence of tailings farming of a copper-pyrite deposit on surface waters. *Mining information and analytical Bulletin*. 2021; 4:57-68. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_4\_0\_57.
13. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Yu. Rehabilitation of man-made facilities, spent copper-crusts deposits on the example of the Levikhinsky mine (Middle Urals). *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2023; 334(8):137-150. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4089.
14. Safina N.P., Korovko A.V., Blinov I.A., Ankusheva N.N., Rassomakhin M.A., Filippova K.A. Mineralogical features and physico-chemical conditions of formation of vein mineralization of the southern flank of the Safyanovsky copper-zinc-pyrite birthplace (Middle Urals). *Mineralogy*. 2024; 10(4):75-97. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-4.
15. Hassan M.A., Aftabuddin M., Meena D.K. [et al.] Clean valorization of distillery indus-try co-product for fish cage aquaculture: a waste-to-wealth approach. *Blue Biotechnology*. 2024; 1:18. DOI: 10.1186/s44315-024-00015-5.
16. Zamotaev, I.V., Gracheva, R.G., Konopliankova, Y.V. [et al.] Soil Formation on Sugar Industry Waste in the Central Chemozemec Zone. *Eurasian Soil Sc.* 2023; 56:1784–1802. DOI: 10.1134/S1064229323601890.
17. Ben Hamed S., Lefi E., Chaieb M. Effect of olive mill waste water on mineral nutrition and growth phenology of *Atriplex halimus*. *Acta Physiol Plant*. 2023; 45:123. DOI: 10.1007/s11738-023-03606-8.
18. Bouargane B., Laaboubi K., Biyoune M.G. [et al.] Effective and innovative procedures to use phosphogypsum waste in different application domains: review of the environmental, economic challenges and life cycle assessment. *J Mater Cycles Waste Manag*. 2023; 25:1288–1308. DOI: 10.1007/s10163-023-01617-8.
19. Mateo K., Cai M., Héroux M. [et al.] Carbon Sequestration during the Application of Processed Municipal Organic Waste in Agriculture: A Review. *Water Air Soil Pollut*. 2024; 235:688. DOI: 10.1007/s11270-024-07482-x.
20. Kolawole I.D., Kolawole G.O., Sanni-manuel B.A. [et al.] Economic impact of waste from food, water, and agriculture in Nigeria: challenges, implications, and applications – a review. *Discov Environ*. 2024; 2:51. DOI: 10.1007/s44274-024-00086-6.
21. Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Perfection of technology for mining shallow deposits of poor complex ores. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2023; 4:376-387. EDN: WWTQFU.
22. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V. Ways to increase the efficiency of underground mining of shallow deposits of poor complex ores. *Problems of subsoil use*. 2022; 4(35):33-43. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.033. EDN: CBDHMR.
23. Isaeva L.G. Cooperation on the use of waste from the mining and processing industry for the production of meliorants and their use in the restoration of disturbed forest areas. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Natural and humanitarian sciences*. 2022; 1(2):100-106. DOI: 10.37614/2949-1185.2022.1.2.012. EDN QAPTXT.
24. Petrova T.A., Rudzish E. Types of meliorants for the reclamation of technogenically disturbed areas of the mining industry. *Mining information and Analytical bulletin*. 2021; 4:100-112.
25. Petrova T.A., Rudzish E. Method of assessing the effectiveness of meliorants in the reclamation of disturbed lands. *Bulletin of Eurasian Science*. 2021; 13(6):1-12.
26. Bożym M., Rybak J. In vitro chronic phytotoxicity of heavy metals and metalloids to *Lepidium sativum* (garden cress). *Ecotoxicology*. 2024; 33:94-103. DOI: 10.1007/s10646-024-02729-z.
27. Bożym M. Assessment of Phytotoxicity of Landfilled Waste and Foundry Dust Based on The Direct Test. *Bull Environ Contam Toxicol*. 2022; 109:1095-1105. DOI: 10.1007/s00128-022-03603-6.
28. Alias C., Zerbini I., Abbà A. [et al.] Ecotoxicity Evaluation of Industrial Waste and Construction Materials: Comparison Between Leachates from Granular Steel Slags and Steel Slags-Containing Concrete Through a Plant-Based Approach. *Bull Environ Contam Toxicol*. 2023; 111:3. DOI: 10.1007/s00128-023-03764-y.
29. Ceylan F. Effects of composts obtained from hazelnut wastes on the cultivation of pepper (*Capsicum annum*) seedlings. *Sci Rep*. 2024; 14:3019. DOI: 10.1038/s41598-024-53638-4.

30. Petrova T.A., Rudzisha E., Alekseenko A.V. [et al.] Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge. *Minerals*. 2022; 12(376):1-19.
31. Fedorenko V.F. On the conceptual principles of the development of naturelike technologies, prevention of degradation of agricultural lands and improvement of soil fertility. *Agroecoengineering*. 2024; 2(119):4-18. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-4-17. ELECTRONIC number: EXJFHB.
32. Benalia M.C., Youcef L., Bouaziz M.G. [et al.] Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater by Chemical Precipitation: Mechanisms and Sludge Characterization. *Arab J Sci Eng*. 2022; 47:5587-5599. DOI: 10.1007/s13369-021-05525-7.
33. Lu Y. [et al.] Mechanism study of Cu (II) adsorption from acidic wastewater by ultrasonic-modified municipal solid waste incineration fly ash. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.cjche.2023.11.019.
34. Zulfikar U., Ayub A., Hussain S. [et al.] Cadmium Toxicity in Plants: Recent Progress on Morphophysiological Effects and Remediation Strategies. *J Soil Sci Plant Nutr*. 2022; 22:212-269. DOI: 10.1007/s42729-021-00645-3.
35. Zhao H., Guan J., Liang Q. [et al.] Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of sassafras seedlings. *Sci Rep*. 2021; 11:9913. DOI: 10.1038/s41598-021-89322-0.
36. Aqeel M., Khalid N., Tufail A. [et al.] Elucidating the distinct interactive impact of cadmium and nickel on growth, photosynthesis, metal-homeostasis, and yield responses of mung bean (*Vigna radiata* L.) varieties. *Environ Sci Pollut Res*. 2021; 28:27376-27390. DOI: 10.1007/s11356-021-12579-5.
37. Zhurova V.G., Svetlichnaya M.S. Studying the effect of potassium, calcium and magnesium ions on plant growth and development. *Achievements of science and education*. 2018; 14(36):13-15.
38. Akanova N.I., Kozlova A.V., Mukhina M.T. The role of magnesium in the plant nutrition system. *Agrochemical Bulletin*. 2021; 6:66-72. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-6-014.
39. Yong S., Chen Q., Xu F. [et al.] Exploring the interplay between angiosperm chlorophyll metabolism and environmental factors. *Planta*. 2024; 260:25. DOI: 10.1007/s00425-024-04437-8.
40. Hamzehzadeh H., Abbaspour H., Safipour Afshar A. [et al.] AMF-mediated salinity adaptation in Pistachio plants: photosynthetic efficiency and ionic balance. *Biologia*. 2025; 80:1-17. DOI: 10.1007/s11756-024-01810-6.
41. Hussain A.A., Kamran K., Ishaq M. [et al.] Optimization of electroosmotic flow to enhance the removal of contaminants from low-permeable soils. *J Appl Electrochem*. 2023; 53:1245-1258. DOI: 10.1007/s10800-023-01845-8.
42. Dalal M., Mansi & Mayandi K. Zoom-in to molecular mechanisms underlying root growth and function under heterogeneous soil environment and abiotic stresses. *Planta*. 2023; 258:108. DOI: 10.1007/s00425-023-04262-5.
43. Shen J., Xiao X., Zhong D. [et al.] Potassium humate supplementation improves photosynthesis and agronomic and yield traits of foxtail millet. *Sci Rep*. 2024; 14:9508. DOI: 10.1038/s41598-024-57354-x.
44. Nassar M.A.A., El-Magharby S.S., Ibrahim N.S. [et al.] Productivity and Quality Variations in Sugar Beet Induced by Soil Application of K-Humate and Foliar Application of Biostimulants Under Salinity Condition. *J Soil Sci Plant Nutr*. 2023; 23:3872-3887. DOI: 10.1007/s42729-023-01307-2.
45. Zaghoul E.M., Awad E.S., Mohamed I. [et al.] Coapplication of organic amendments and natural biostimulants on plants enhances wheat production and defense system under saltalkali stress. *Sci Rep*. 2024; 14:29742. DOI: 10.1038/s41598-024-77651-9.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). The authors declare no conflict of interest.

#### About the authors:

**Natalia I. Antoninova** – head of the Laboratory of Ecology of Mining Production, Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, (620075, Russia, Ekaterinburg, Mamina-Sibiriyaka St., 58), Candidate of Technical Sciences, ORCID iD: 0000-0002-8503-639X, e-mail: natal78@list.ru

**Artem V. Sobenin** – researcher, Laboratory of Ecology of Mining Production, Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, (620075, Russia, Ekaterinburg, Mamina-Sibiriyaka St., 58), ORCID iD: 0000-0001-5513-5680, e-mail: arsob@yandex.ru

**Albert I. Usmanov** – researcher, Laboratory of Ecology of Mining Production, Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, (620075, Russia, Ekaterinburg, Mamina-Sibiriyaka St., 58), ORCID iD: 0000-0002-3650-0467, e-mail: albert3179@mail.ru

**Yaroslav A. Kuznetsova**, Junior Researcher at the Laboratory of Mining Ecology, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, (58 Mamina-Sibiriyak str., Yekaterinburg, 620075, Russia), ORCID ID: 0000-0002-7808-8474, e-mail: Yaroslavl.brusnitsyna@mail.ru

#### Contribution of the authors:

Natalia Yu. Antoninova – setting a research task, reviewing relevant literature, collecting and analyzing data, conclusions, writing a text.

Artem V. Sobenin – setting a research task, reviewing relevant literature, collecting and analyzing data, conclusions, writing a text.

Albert I. Usmanov – setting a research task, reviewing relevant literature, collecting and analyzing data, conclusions, writing a text.

Yaroslav A. Kuznetsova – setting a research task, reviewing relevant literature, collecting and analyzing data, conclusions, writing a text.

All authors have read and approved the final manuscript.

