ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Поиск эффективных решений по восстановлению почвенно-растительного покрова на загрязненных территориях города Карабаш

В.А.Матвеева✉, Д.О.Нагорнов, Ю.М.Сальникова
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Матвеева В.А., Нагорнов Д.О., Сальникова Ю.М. Поиск эффективных решений по восстановлению почвенно-растительного покрова на загрязненных территориях города Карабаш // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 120-135. EDN MBGVIP

Аннотация
Деятельность предприятий цветной металлургии приводит к образованию в почвенном покрове близлежащих территорий устойчивых полиметаллических загрязнений, что при длительном негативном воздействии заканчивается деградацией почвенно-растительного покрова. С учетом масштабности проблемы проведена серия экспериментальных исследований по моделированию процесса произрастания растений на сильнозагрязненных тяжелыми металлами кислых почвах для поиска комплексного решения по восстановлению почвенно-растительного покрова. Эксперимент заключался в определении наиболее эффективных почвенных добавок для восстановления кислых почв Карабаша (Челябинская обл.), характеризующихся высоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами. По результатам теоретических исследований в качестве почвоулучшающих добавок для эксперимента были выбраны известь, низинный торф, вермикулит, биочар и мелатонин. Представлены результаты лабораторных исследований состава и свойств почв до и после проведения эксперимента, а также результаты визуальной, количественной и химической оценки растительной биомассы. На основании экспериментальных исследований были определены наиболее эффективные почвенные добавки, которые позволяют не только снизить влияние тяжелых металлов на растения, но и повысить их фитомассу. Наилучшие результаты были получены при нейтрализации почвы известью, улучшении физико-механических свойств путем внесения вермикулита, повышении содержания органического вещества за счет низинного торфа и добавлении таких почвоулучшающих добавок широкого спектра действия, как биочар и мелатонин. Комплексное использование почвенных добавок позволило нейтрализовать сильнокислые почвы до pH 6,6-7,5, снизить концентрацию подвижной меди как основного поллютанта в четыре и более раз, а также создать устойчивую корневую систему и здоровую наземную часть растений.

Ключевые слова
ремедиация; почвенно-растительный покров; кислые почвы; тяжелые металлы; почвенные добавки; известкование; биочар; мелатонин; низинный торф; вермикулит

Финансирование
Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Исследование процессов комплексного освоения недр Земли и глубокой переработки георесурсов» (FSRW-2026-0003).

Поступила: 13.06.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 02.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Современное загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ) представляет одну из наиболее серьезных глобальных угроз для устойчивости природных экосистем и здоровья человека. В отличие от органических поллютантов, подверженных микробиологической и (или) абиотической деградации, подавляющее большинство тяжелых металлов и металлоидов характеризуется высокой персистентностью – они практически не подвергаются биодеградации или химическому разложению в почвенной среде и способны длительно, на протяжении десятилетий и столетий, сохраняться и накапливаться в почвенном профиле. Период полуудаления в результате вымывания, потребления растениями, эрозии и дефляции длится от 13 до 110 лет для Cd, от 70 до 510 лет для Zn,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

от 310 до 1500 лет для Cu, от 740 до 5900 лет для Pb [1]. Деятельность человека является одним из ключевых факторов повышения содержания ТМ в почвах. Наибольшее воздействие оказывается вблизи крупных городов и промышленных центров, именно на данных территориях чаще всего наблюдаются высокие концентрации тяжелых металлов в почвах [2, 3]. Отдельно стоит отметить вклад горной отрасли, которая приводит к деградации обширных территорий и формированию техногенных ландшафтов [4].

В зонах с высокой техногенной нагрузкой, в частности на территориях, где функционируют предприятия цветной металлургии, в почвенном покрове наблюдаются полиметаллические аномалии. Деятельность предприятий цветной металлургии приводит к аккумуляции в почвах Cu, Ni, Pb и Cd [5, 6]. Содержание металлов в почвах в зоне воздействия градообразующих предприятий превышает нормативные значения в 5-10 и более раз (Мончегорск, Кировград, Реж, Асбест, Ревда) [7, 8].

Главный источник поступления тяжелых металлов в почву – атмосферные выбросы, что подтверждают исследования, проведенные в России, Канаде, США, Франции, Китае и других странах [9]. В районе прямого воздействия металлургических предприятий почвенный слой претерпевает глубокую техногенную трансформацию: происходит подавление фитоценозов и формирование обширных техногенных пустошей с полным отсутствием растительного покрова. В верхних горизонтах почвенного профиля фиксируется значительная аккумуляция тяжелых металлов как в подвижных, так и в связанных формах. Подвижные формы металлов обладают высокой биодоступностью и активно поглощаются корнями растений [10], что вызывает многократное превышение их содержания в фитомассе. Вследствие этого накопленный экологический ущерб может длительное время оказывать негативное влияние на почвенно-растительный покров, приводя к его угнетению и полному исчезновению [2], кроме того, территории накопленного экологического вреда являются источниками загрязнения всех компонентов окружающей среды [11].

В России высокая плотность объектов минерально-сырьевого комплекса, деятельность которых приводит к комплексному загрязнению природной среды, наблюдается на Среднем и Южном Урале [12]. Именно там сконцентрирована крупнейшая горно-рудная и металлургическая базы страны. Некоторые районы Челябинской обл. могут быть отнесены к зонам экологического бедствия – содержание в почвах тяжелых металлов в 25 и более раз превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) [13].

Наглядным примером являются техногенные пустоши, образовавшиеся вследствие продолжительного негативного воздействия Карабашского медеплавильного комбината (АО «Карабашмедь»). Данное предприятие расположено в Карабаше, на северо-западе Челябинской обл., является градообразующим и специализируется на производстве черновой и анодной меди. Долгое время, более 90 лет, предприятие работало без должной системы газоочистки, что привело к образованию объектов накопленного экологического вреда. И несмотря на проведенную в 2004 г. модернизацию предприятия, в том числе установку эффективного газоочистного оборудования, продолжительная аккумуляция поллютантов привела к необратимой деградации почвенно-растительного покрова.

Объектом исследования являются кислые сильнозагрязненные почвы горы Лысая, расположенной на территории Карабашской горно-промышленной агломерации. Несмотря на снижение уровня аэротехногенной нагрузки, почвы остаются сильно загрязненными, а растительный покров отсутствует [14]. Содержание поллютантов достигает концентраций в 400 раз превышающих ПДК по меди, в 300 раз – по свинцу и в 10 раз – по никелю [15, 16]. Загрязнение почв тяжелыми металлами привело к угнетению растительного покрова, который препятствовал в том числе эрозионным процессам и миграции загрязнителей. На сегодняшний день на рассматриваемой территории присутствуют глубокие эрозионные овраги, кроме того, за счет ветровой дефляции нарушены физические свойства и структура почв. Указанные процессы приводят к распространению тяжелых металлов со склонов горы вместе с ветровыми потоками в атмосфере и с дождевыми и талыми водами в гидросфере. Длительное негативное воздействие привело к невозможности самозарастания горы, даже с учетом минимизации техногенного воздействия. Для решения сложившейся проблемы требуется применение дополнительных эффективных мер по улучшению состава и свойств почв для формирования надежного противоэрозионного почвенно-растительного покрова.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Обычные методы рекультивации в случае кислых сильнозагрязненных тяжелыми металлами почв показывают низкую эффективность, поскольку кислая среда (pH ниже 5,5) усиливает растворимость и подвижность таких металлов, как Cu, Ni, Pb и Cd. При сильном загрязнении, превышающем ПДК в десятки раз, стандартных доз мелиорантов недостаточно, содержание подвижных форм металлов остается высоким даже после обработки. Это приводит к длительным срокам восстановления и риску повторного высвобождения загрязняющих веществ (ЗВ) [17].

В настоящее время для решения проблемы загрязнения почв тяжелыми металлами применяется ремедиация, которая подразделяется на три вида – физическая, химическая и биологическая [18, 19]. Ввиду актуальности темы проводится множество исследований новых методов для восстановления почв, в том числе загрязненных тяжелыми металлами [20]. Большинство исследований в области ремедиации проводится на концентрациях, превышающих нормативы качества окружающей среды в 5-10 раз, но при длительном негативном воздействии металлургических предприятий на почвы могут наблюдаться превышения и в 100-500 раз. Такие показатели действительны для выбранного объекта исследований. В этой связи целью работы стала разработка комплексного решения, которое будет способствовать восстановлению устойчивого почвенно-растительного покрова на загрязненной территории Карабаша, препятствующего развитию эрозионных процессов и распространению загрязняющих веществ. Кроме этого, восстановление растительного покрова на обширной территории в пределах городской черты несомненно улучшит облик города. Для достижения поставленной цели авторами в рамках исследования решались следующие задачи: оценка состояния деградированной территории; теоретические исследования используемых на практике и перспективных почвенных добавок, пригодных для восстановления почв с составом и свойствами, соответствующими проанализированным; проведение модельных экспериментов по созданию устойчивого растительного покрова на сильнозагрязненных кислых почвах с использованием индивидуальных и комплексных почвенных добавок; оценка динамики изменения качества изучаемых почв, аккумуляции поллютантов растениями и общего состояния растений.

Физическая ремедиация имеет серьезный недостаток – высокие затраты на реализацию. С учетом площади загрязнения (более 1000 га) данный способ является крайне затратным и непривлекательным. К нему можно прибегнуть только в случае невозможности восстановления растительного покрова за счет улучшения качества почв.

Применение фиторемедиации недостаточно изучено в полевых условиях для прогнозирования эффективности ее проведения на таких обширных территориях с высокими концентрациями меди. Кроме того, многие виды фиторемедиации подразумевают снятие и утилизацию растительности через определенное время, что требует серьезных капиталовложений.

Наиболее выгодными являются химические методы ремедиации. На сегодняшний день проводится множество исследований по анализу применения не только реагентов, но и комплексных добавок, а также добавок на основе отходов производства [21, 22]. Комплексное использование почвоулучшающих наполнителей может позволить не только снизить pH кислых почв, но и способствовать переходу подвижных форм тяжелых металлов в менее подвижные, а также сорбции ЗВ.

С учетом недостатков рассмотренных методов ремедиации наиболее перспективным является применение комплексных решений, основанных на использовании химической ремедиации в комплексе с почвенными добавками.

Материалы и методы

Характеристика почв. Для проведения экспериментальных исследований в полевой сезон 2024 г. было отобрано 17 представительных проб на территории горы Лысая (Карабаш, Челябинская обл.). Пробы были отобраны и подготовлены в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017[1]. Проведенные лабораторные исследования показали, что исследуемые почвы характеризуются как очень сильнокислые с высоким уровнем содержания тяжелых металлов. Результаты химического анализа показали, что содержание ТМ в подвижной форме варьируется в следующих диапазонах, мг/кг:

[1] ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа (введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 января 2019 г.).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Cu 0,5-1400 (0,2-466 ПДК), Ni 1,5-49 (0,37-12 ПДК), Pb 0,1-130 (0,017-21 ПДК)[2]. По содержанию органического вещества пробы весьма разнородны – от 1,6 до 17,2 %[3]. Водородный показатель водных вытяжек[4] колеблется от 4,2 до 7,0, солевых вытяжек[5] – от 3,5 до 4,9. Большинство проб по степени кислотности относятся к очень сильнокислым (pH_{KCl} < 4,0). Значения гидролитической кислотности расположены в широком диапазоне[6] – от минимального (менее 0,23 мг-экв/100 г почвы) до максимального (более 145 мг-экв/100 г почвы).

Согласно данным, полученным в ходе лабораторного анализа проб, был сделан вывод, что почвы разнородны, отличаются по химическому составу и физико-механическим свойствам. В этой связи для проведения экспериментальных исследований все пробы были разделены на две группы, чтобы максимально эффективно подобрать почвенные добавки (табл.1). На основании ранее проведенных авторами исследований ключевыми показателями для разделения проб почв на группы стали pH_{KCl} и концентрация меди в подвижной форме как основного загрязнителя [15]. На основании анализа состава и свойств почв каждой из групп для модельного эксперимента были выбраны четыре пробы из группы 1 и четыре пробы из группы 2. Пробы выбирались по всей ширине диапазонов определенных параметров, чтобы можно было оценить влияние добавок на группу в целом.

Таблица 1

Характеристика экспериментальных групп почв

Группа	Количество проб для эксперимента	pH_{KCl}	Концентрация меди в подвижной форме, мг/кг	Гидролитическая кислотность, мг-экв/100 г почвы
1	4	3,9-4,9	0,5-300	0,23-58
2	4	3,5-3,7	410-1400	103-132

Почвенные добавки. Для выбора почвенных добавок, способных улучшить качество рассматриваемых почв для восстановления почвенно-растительного покрова на рассматриваемой территории, авторами был выполнен комплексный анализ исследований по теме. В современных научных исследованиях почвенные добавки изучаются преимущественно в направлениях химической стабилизации и фиторемедиации со стимуляторами роста растений. В качестве химических стабилизаторов в литературе упоминаются каолинит, аттапульгит, сепиолит, монтмориллонит, вермикулит, гипс, биочар, цеолит, фосфат из рисовой соломы, гидроксиапатит, осадки очистки вод, оксиды и сульфиды железа, древесная зола, отходы животноводства, торф; в качестве биостимуляторов для интенсификации фиторемедиации – гуминовые вещества, тиосульфаты, экстракты морских водорослей, различные полезные микроорганизмы (*Trichoderma pseudokoningii*, *Trichoderma harzianum*, *Burkholderia cepacia*, *Bacillus subtilis*, *Paenibacillus jamilae* и др.), растительные экстракты (*Oxalis corniculate*, *Medicago sativa*, *Moringa oleifera*, корни *Glycyrrhiza glabra* и др.) и мелатонин. Стоит отметить, что основным недостатком существующих научных исследований является исследование почв, загрязненных концентрациями тяжелых металлов на уровне 2-50 ПДК [23, 24], однако в реальных условиях на территориях техногенных пустошей, в том числе на рассматриваемой территории, кратность превышений значительно выше. Кроме этого, зачастую исследование эффективности почвенных добавок проводится на искусственно загрязненных почвах с pH > 6,0. Из спектра существующих почвоулучшителей для проведения экспериментальных исследований на реальных образцах кислых загрязненных почв были выбраны наиболее перспективные (табл.2).

[2] М-МВИ-80-2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной спектрометрии и атомно-абсорбционной спектрометрии. СПб: Мониторинг, 2008. 27 с.

[3] ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.12.2016 № 2096-ст).

[4] ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки (утв. и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 08.02.1985 № 283).

[5] ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 26.03.1985 № 820).

[6] ГОСТ 26212-91. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО (утв. и введен в действие Постановлением Комитета стандартизации и метрологии СССР от 29.12.1991 № 2389).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Растения. Для проведения вегетационного опыта на специально подготовленных образцах почвы с использованием упомянутых почвенных добавок была использована смесь семян: райграс многолетний (*Lolium perenne*) – 45 %, овсяница красная (*Festuca rubra*) – 30 %, мятлик луговой (*Poa pratensis*) – 20 %, овсяница овечья (*Festuca ovina*) – 5 % [25]. Данные растения были выбраны для эксперимента, поскольку применяются в смесях для гидропосева при рекультивации нарушенных земель, а также произрастают в лесостепной зоне Челябинской обл. [26]. В каждый опытный образец почвы вносилось по 1 г смеси семян.

Таблица 2

Почвенные добавки для постановки лабораторного эксперимента

Добавка	Оказываемое воздействие (преимущества и недостатки)	Потенциальные поставщики
Известь (крупность 0-0,09 мм)	Нейтрализация почв. Снижение поступления тяжелых металлов в растения. Активизация деятельности полезных микроорганизмов (азотфиксирующих и нитрифицирующих бактерий). Улучшение развития клубеньковых бактерий. Усиление азотного питания растений. Перевод труднорастворимых почвенных соединений фосфора в усвояемые формы. Адсорбция тяжелых металлов из почвенного раствора [27]. Передозировка может привести к защелачиванию почв и нарушению баланса питания растений. При недостатке органики может усилить разложение гумуса, что приведет к частичной потере органического вещества	Варненское месторождение, ООО «Варненский дробильно-сортировочный комплекс» (Варненский р-н, Челябинская обл.). Расстояние от объекта исследования – 300 км
Вермикулит (крупность 3-5 мм)	Улучшение физико-механических свойств почв. Защита от развития грибковых заболеваний за счет гнилостойкости [28]. Защита от перегревания в жаркий период за счет теплоизолирующей способности. Сорбция тяжелых металлов [29]. Переувлажнение почв может приводить к ухудшению аэрации и провоцировать загнивание корней	Потанинское месторождение, ООО «Уралвермикулит» (Кыштым, Челябинская обл.). Расстояние от объекта исследования – 50 км
Низинный торф (крупность 0-15 мм, pH > 5,5)	Благоприятное влияние на питательный и микробиологический состав почв [30]. Слабокислая или нейтральная реакция среды (pH 5,5-7,0). Улучшение физико-механических свойств почв: влагопроницаемости, воздухоемкости, плотности и пористости (связывание песков и разрыхление глины). Устранение накопленных в растениях различных форм тяжелых металлов и других токсичных веществ [31]. Не является надежным способом обезвреживания тяжелых металлов в подвижных формах. Избыток приводит к нарушению воздушного режима	Мало-Рефтинское месторождение, ООО «Фабрика грунтов» (Березовский городской округ, Свердловская обл.). Расстояние от объекта исследования – 230 км
Биочар (крупность 1-5 мм, сырье – березовые древесные отходы)	Повышение пористости, улучшение водопроницаемости, аэрации и структуры почвы [32]. Увеличение углеродного запаса и связывание CO_2. Снижение доступности тяжелых металлов. Повышение pH в кислых почвах. Удерживание элементов питания (N, P, K, Ca, Mg и др.) за счет высокой катионообменной емкости и пористой поверхности [33]. Уменьшение вымывания удобрений, повышение эффективности использования азота и фосфора растениями. Стимуляция микроорганизмов и почвенной биоты [33]. Риск вторичного загрязнения почв в зависимости от исходного сырья для производства биочара	ООО «Мадерум» (Пластовский р-н, Челябинская обл.). Расстояние от объекта исследования – 170 км

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Окончание табл.2

Добавка	Оказываемое воздействие (преимущества и недостатки)	Потенциальные поставщики
Мелатонин (суспензия)	Повышение толерантности растений к содержанию тяжелых металлов в почвах [34]. Снижение уровня реактивных форм кислорода, малонового диальдегида и других маркеров окислительного повреждения растений тяжелыми металлами. Активизация антиоксидантных систем растений. Повышение фитомассы растений. Повышение содержания хлорофилла и улучшение фотосинтетической активности при стрессе [35]. Увеличение накопления N, P, K, Ca и Mg в тканях растений (до 34-82 % в зависимости от элемента), восстановление питательного баланса. Повышение численности бактерий, грибов и актиномицетов, что приводит к улучшению биологической активности и структуры почвенного сообщества. Успешное сочетание с другими мелиорантами, повышение эффективности снижения доступности тяжелых металлов и окислительного стресса [36]. Дороговизна из-за отсутствия производства в промышленных масштабах как стимулятора роста. Не оказывает нейтрализующее или сорбционное влияние на почвы	Промышленное производство на территории РФ в рамках рассматриваемой деятельности отсутствует

План эксперимента. Экспериментальные исследования проводились на базе научного центра «Оценка техногенной трансформации экосистем» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. Выращивание травосмеси проводилось в течение 30 сут в фитостеллаже НЛО 79-03-04 LD с промежуточной фиксацией результатов. Источником освещения служил LED-светильник полного белого спектра с возможностью диммирования, режим инсоляции с высоты подвеса 0,5 м составил 10000 лк с фотопериодом 16/8 ч (день/ночь). Периодический полив производили с использованием низкоминерализованной воды. Всего было поставлено шесть серий экспериментов (табл.3). Для визуального контроля в каждой серии экспериментов ставился опыт на незагрязненном грунте. Каждый эксперимент был выполнен на образцах обеих групп в двух повторностях. Эксперименты проводились поэтапно. На первом этапе проводился анализ доступных и широко применяемых на практике добавок, но они не позволили достичь требуемого эффекта (создания устойчивого растительного покрова), однако положительное влияние было оказано, поэтому на следующем этапе в лучший вариант дополнительно вносились сорбенты и стимуляторы роста растений.

Таблица 3

Состав модельного эксперимента

Серия эксперимента	Номер эксперимента	Добавки	
		Известь*	Прочие
1 (фон)	1-1	Без извести	Без добавок
2	2-1	1Д	Без добавок
	2-2	2Д	Без добавок
	2-3	4Д	Без добавок
3	3-1	Без извести	Торф
	3-2	Без извести	Вермикулит
	3-3	Без извести	Торф, вермикулит
4	4-1	1Д	Торф, вермикулит
	4-2	2Д	Торф, вермикулит
	4-3	4Д	Торф, вермикулит
5	5-1	1Д	Биочар, торф, вермикулит
	5-2	2Д	Биочар, торф, вермикулит
	5-3	4Д	Биочар, торф, вермикулит
6	6-1	1Д	Мелатонин, торф, вермикулит
	6-2	2Д	Мелатонин, торф, вермикулит
	6-3	4Д	Мелатонин, торф, вермикулит

* Дозы: 1Д – расчетная, 2Д – двухкратная, 4Д – четырехкратная.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Известь вносилась в расчетной (однократной), двухкратной и четырехкратной дозах. Увеличение дозы извести по сравнению с расчетной связано с тем, что при проведении известкования она расходуется не только на нейтрализацию кислотности, но и на связывание тяжелых металлов, компенсацию потерь оснований и обогащение почвы кальцием [28, 37]. Доза извести рассчитана на основе данных о максимальной гидролитической кислотности для группы и объема пробы,

$$P_{CaCO_3} = H \cdot 0{,}05hd,$$

где H – гидролитическая кислотность, мг-экв/100 г; h – мощность обрабатываемого слоя почвы, см; d – плотность обрабатываемого слоя почвы, г/см^3.

Доза для группы 1 составила 7,1 г, для группы 2 – 12,2 г.

В исследованиях используются различные отношения почвы к торфу и вермикулиту, изменяющиеся в широких пределах. Так, почву с торфом смешивают в соотношении 50-95 мас.% почвы и 5-50 мас.% торфа, количество вносимого вермикулита варьируется в пределах 5-20 мас.% [38-40]. Таким образом, на основании теоретических исследований с учетом опытных данных и экономической целесообразности для эксперимента были выбраны массовые соотношения: почва и торф – 8:2, почва и вермикулит – 8:1, почва, торф и вермикулит – 8:2:1.

Мелатонин вносился в виде суспензии с концентрацией действующего вещества 200 мкмоль/л в 1-е и 14-е сут эксперимента [41]. Итоговая доза внесения мелатонина составила 10 мкмоль на 1 кг почвы, данное количество мелатонина считается достаточным для стимуляции роста и повышения толерантности растительности к воздействию ТМ [42, 43]. Количество биочара в составе комплексной добавки составило 10 мас.%.

Анализ результатов эксперимента, включающий оценку эффективности почвенных добавок, проводился в трех направлениях – визуальная и количественная оценка растительной фитомассы; оценка динамики изменения качества почв; оценка эффективности накопления тяжелых металлов растениями.

Визуальная оценка позволяет выявить проблемы, связанные с воздействием ТМ на процесс фотосинтеза (хлороз, некроз растений), а также продуктивность растений [44]. Фитомасса наземной части отражает воздействие почвенных добавок на рост и развитие в течение всего вегетационного периода растений [45]. Корневая фитомасса указывает на способность растений осваивать загрязненную почву, поглощать питательные вещества, а также показывает устойчивость растений к стрессу и эффективность почвенных добавок. При сильном негативном воздействии тяжелых металлов возможно значительное угнетение корневой системы [46]. В данном исследовании визуальная оценка проводилась в течение всего эксперимента и включала в себя внешнюю оценку побегов, их цвета и густоты, а по истечении 30 сут – степени корнеобразования. После этого побеги были отделены от почвы и высушены до воздушно-сухого состояния. Корни также высушивались до воздушно-сухого состояния, были отделены от остатков почвы, промыты и повторно высушены. Высушенные пробы побегов и корней взвешивались на весах PA-214C (OHAUS Instruments, Китай). Далее корни и побеги были измельчены в механической ступке AM200S (ANTS Scientific Instruments, Китай).

Оценка динамики изменения качества почв проводилась по ключевым параметрам – pH_{KCl} и содержанию тяжелых металлов в подвижной форме. Определение pH_{KCl} проводилось в соответствии с ГОСТ 26483-85[7] с использованием pH-метра МАРК-903 (ООО «ВЗОР», Россия). Количественный анализ подвижных форм тяжелых металлов в почвах методом атомной эмиссионной спектрометрии (ICP) проводился в соответствии с методикой М-МВИ-80-2008[8] с использованием атомно-эмиссионного спектрометра ICPE-9000 (Shimadzu, Япония).

Определение эффективности накопления тяжелых металлов растениями проводилось для оценки их биодоступности. Данный показатель позволяет однозначно установить лимитирующий

[7] ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 26.03.1985 № 820).

[8] М-МВИ-80-2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной спектрометрии и атомно-абсорбционной спектрометрии. СПб: Мониторинг, 2008. 27 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

принцип работы комплексной добавки, который заключается в стабилизации тяжелых металлов и предотвращении их дальнейшей миграции в побеги растений [35] или в повышении толерантных свойств растений к негативному воздействию ТМ. Подготовка проб проводилась следующим образом [47]. Из измельченных проб (отдельно побеги, отдельно корни) отбирались навески 0,1 г для мокрого озоления. Озоление проводилось концентрированной азотной кислотой (2 мл) и перекисью водорода (2 мл) в системе микроволнового разложения Multiwave 3000 (Anton Paar, Австрия). После остывания растворы количественно переносили в мерные полиэтиленовые пробирки на 20 мл и доводили до метки дистиллированной водой. Для каждого образца готовились две параллельные пробы, а также холостой раствор. Полученные растворы анализировались на содержание элементов в валовой форме методом ICP на спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9000.

Обсуждение результатов

Визуальная и количественная оценка растительной фитомассы. Визуальная оценка растительности позволила сделать первоначальные выводы о воздействии почвенных добавок на рост и развитие растений. В ходе внешней диагностики наземной части растений были зафиксированы следующие результаты. Растения, выросшие на почвах без применения добавок (серия экспериментов 1), отличались низкорослостью, слабыми и тусклыми побегами. На 16-й день эксперимента стали заметны существенные признаки увядания и проблемы с поступлением влаги в растения, к концу эксперимента появился некроз кончиков побегов и потеря тургора. В данном эксперименте также было зафиксировано негативное воздействие ТМ на корневую систему растений. В пробах второй группы корневая система практически не развита (рис.1).

Внесение извести (серия экспериментов 2) дает положительные результаты, наблюдается формирование корневой системы, но в то же время заметны следы некроза и в части проб – потеря тургора. При этом, в случае применения однократной дозы извести, некротические изменения и степень усыхания побегов отмечаются в меньшей степени.

Использование торфа (эксперимент 3-1) способствует увеличению фитомассы наземной части растений на первом этапе и образованию корневой системы, но использование одного лишь торфа привело к частичному загниванию корневой системы из-за неблагоприятных физико-механических свойств полученного образца почвы. Отчасти положительный результат заметен и при внесении в почву вермикулита (эксперимент 3-2). Растения отличались сравнительно высоким тургором побегов, но данная добавка не способствовала развитию корневой системы, особенно в группе 2, где оно осталось практически на том же уровне, что и в образцах почв без добавок. В смеси (эксперимент 3-3) данные добавки позволили избежать развития процессов гниения, улучшив физико-механические свойства почвы, но практически не изменили состояние слабой

Номер группы	Эксперимент 1-1	Эксперимент 2-1	Эксперимент 3-1	Эксперимент 3-2	Эксперимент 3-3	Эксперимент 4-1	Эксперимент 5-1	Эксперимент 6-1
1								
2								

Рис.1. Внешний вид растений при использовании различных почвенных добавок по окончании вегетационного опыта

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

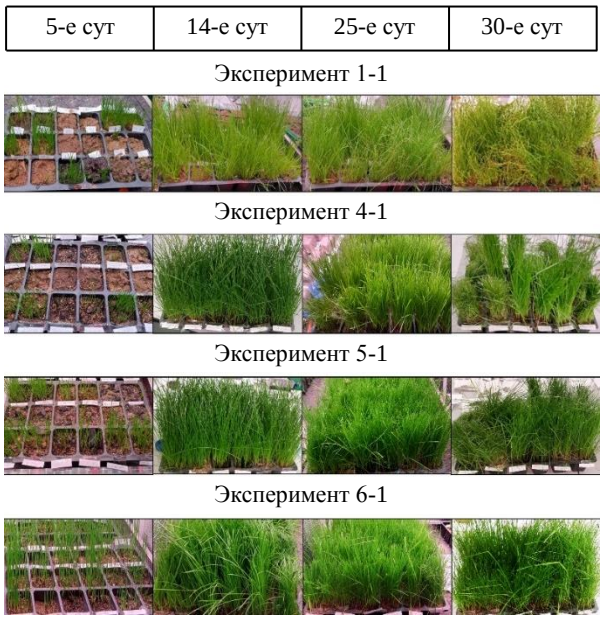


Рис.2. Этапы формирования побегов при использовании различных почвенных добавок за весь период проведения вегетационного опыта

корневой системы. Повышение упругости побегов может говорить о том, что в исходных пробах было низкое содержание важных питательных веществ, что препятствовало росту растений. Отсутствие значительного влияния на корневую систему связано с высокими концентрациями ТМ, которые даже при условии наличия питательных веществ угнетают корневую системы. Данные результаты нельзя считать достаточными для восстановления растительности на рассматриваемой территории. Поскольку целью работы является создание устойчивого противоэрозионного почвенно-растительного покрова, угнетение корневой системы не позволит этого достичь.

Серия экспериментов 4 позволила оценить комплексное влияние торфа, вермикулита и извести. Если в предыдущих экспериментах в ряде случаев были зафиксированы проблемы с развитием корневой системы, то в данном эксперименте она была сформирована во всех пробах. Использование однократной дозы извести в комплексной добавке дало положительный эффект, по результатам визуальной оценки. В каждой из групп наблюдалось улучшение показателей по сравнению с использованием индивидуальных добавок, однако локально, при использовании двукратной и четырехкратной доз, отмечался невысокий тургор и некротические изменения растений. Количество некротических участков возрастало с повышением дозы извести.

Использование комплексной добавки с биочаром в составе (серия экспериментов 5) дало один из наилучших результатов – высокую фитомассу, насыщенный цвет растительности, высокий тургор. Оптимальная доза извести в данном эксперименте – однократная (расчетная). Схожие результаты визуальной оценки наблюдаются и при использовании мелатонина (серия экспериментов 6). При использовании в экспериментах 5 и 6 четырехкратной дозы извести наблюдалось угнетение растительности. Двухкратная доза извести не давала значительных улучшений в сравнении с расчетной, что позволило сделать предварительный вывод об отсутствии необходимости внесения доз извести сверх расчетной.

По результатам визуальной оценки был сделан вывод, что наиболее эффективными стали комплексные почвенные добавки на основе торфа, вермикулита и извести с добавлением в состав биочара или мелатонина. В качестве примера на рис.2 представлены этапы формирования побегов для экспериментов 1-1, 4-1, 5-1, 6-1 в течение 30 сут.

Для подтверждения результатов визуальной диагностики и проведения сравнительного анализа была выполнена количественная оценка фитомассы наземной части растений путем взвешивания подготовленных образцов (табл.4). Ввиду отсутствия необходимости дополнительного подтвержения результатов визуальной оценки экспериментов с использованием извести без внесения торфа и вермикулита (2-1, 2-2, 2-3), а также торфа и вермикулита по отдельности (3-1, 3-2) масса побегов данных образцов не оценивалась.

Результаты, представленные в табл.4, подтверждают выводы, сделанные в ходе визуальной оценки. Наибольшие значения массы побегов характерны для серий экспериментов 4, 5 и 6. При этом, в каждой из указанных серий лучшие результаты отмечаются в случае использования однократной дозы внесения извести. Для этих экспериментов также определялась масса корней (табл.5). Для сравнения в группе 1 был выбран эксперимент 3-3. В образцах без применения почвенных добавок и в группе 2 эксперимента 3-3 корневая система была недостаточно развита для фактической оценки ее массы.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 4

Масса наземной части растений (побегов), г

Номер группы	Номер пробы	Номер эксперимента										
		1	3-3	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	5-3	6-1	6-2	6-3
1	1.1	0,53	0,54	1,21	1,20	1,07	1,42	1,40	1,04	1,43	1,12	0,98
	1.2	0,43	0,56	1,18	1,12	0,98	1,23	1,15	1,02	1,42	1,38	1,03
	1.3	0,36	0,36	1,12	1,10	0,86	1,21	1,16	1,05	1,18	1,03	0,96
	1.4	0,48	0,51	1,12	1,11	0,83	1,22	1,14	1,07	1,32	1,13	0,85
	Среднее	**0,45**	**0,49**	**1,16**	**1,13**	**0,94**	**1,27**	**1,21**	**1,05**	**1,34**	**1,17**	**0,96**
2	2.1	0,42	0,47	1,08	1,01	0,98	1,11	0,98	0,95	1,31	1,3	0,92
	2.2	0,24	0,49	1,12	0,97	0,81	1,14	0,99	0,97	1,21	1,14	0,83
	2.3	0,46	0,44	1,02	1,06	0,74	1,02	1,02	0,98	1,17	1,08	0,64
	2.4	0,18	0,48	1,17	1,22	0,68	1,22	1,18	0,89	1,18	1,05	0,72
	Среднее	**0,33**	**0,47**	**1,10**	**1,07**	**0,80**	**1,12**	**1,04**	**0,95**	**1,22**	**1,14**	**0,78**

Таблица 5

Масса подземной части растений (корней), г

Номер группы	Номер пробы	Номер эксперимента									
		3-3	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	5-3	6-1	6-2	6-3
1	1.1	0,38	0,49	0,43	0,41	0,60	0,52	0,50	0,68	0,63	0,57
	1.2	0,34	0,46	0,40	0,34	0,62	0,51	0,43	0,71	0,66	0,60
	1.3	0,36	0,41	0,38	0,34	0,53	0,49	0,42	0,70	0,64	0,56
	1.4	0,27	0,37	0,24	0,20	0,46	0,38	0,35	0,57	0,56	0,49
	Среднее	**0,34**	**0,43**	**0,36**	**0,32**	**0,55**	**0,48**	**0,43**	**0,67**	**0,62**	**0,56**
2	2.1	–	0,36	0,31	0,29	0,45	0,44	0,40	0,82	0,73	0,52
	2.2	–	0,34	0,29	0,24	0,56	0,44	0,34	0,97	0,92	0,92
	2.3	–	0,31	0,29	0,25	0,46	0,34	0,31	0,79	0,71	0,59
	2.4	–	0,32	0,24	0,22	0,46	0,32	0,22	0,69	0,65	0,48
	Среднее	–	**0,33**	**0,28**	**0,25**	**0,48**	**0,39**	**0,32**	**0,82**	**0,75**	**0,63**

По результатам совместной оценки количественных показателей для побегов и корней можно сделать вывод, что известкование (эксперименты 4-1, 4-2) положительно влияет на фитомассу побегов растений, но не позволяет создать устойчивою корневую систему для образцов группы 2 и, как следствие, противоэрозионный растительный покров. Кроме того, результаты взвешивания корней подтверждают ранее сделанный вывод о том, что увеличение доз извести сверх расчетной негативно сказывается на корневой системе (эксперименты 5-2, 5-3, 6-2, 6-3).

Оценка динамики изменения качества почв при внесении почвенных добавок. Визуальная и количественная оценки растительности показали отрицательные результаты (отсутствие корневой системы, снижение тургора побегов, следы некроза и др.) в экспериментах 1-1, 2-1, 2-2, 2-3, 3-1, 3-2, поэтому образцы этих серий в дальнейшей оценке не участвовали. На данном этапе была определена кислотность почв после проведения опыта (табл.6).

По результатам, представленным в табл.6, видно, что добавление торфа и вермикулита (эксперимент 3-3) в почвы повышает pH, но не приводит к их нейтрализации, почвы остаются кислыми. В свою очередь, известкование однократной расчетной дозой извести является достаточным для всех рассматриваемых проб почв. При внесении четырехкратной и, в некоторых случаях, двукратной доз извести наблюдается подщелачивание почв до слабощелочной среды (pH > 7,2).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 6

Реакция среды почв (pH$_{KCl}$*) до и после проведения вегетационного опыта

Номер группы	Номер пробы	Номер эксперимента										
		Исх.**	3-3	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	5-3	6-1	6-2	6-3
1	1.1	4,86	5,05	7,01	7,20	7,29	7,11	7,28	7,33	7,01	7,29	7,40
	1.2	4,45	5,51	7,13	7,42	7,66	7,49	7,70	7,92	7,24	7,50	7,76
	1.3	4,48	5,50	7,24	7,33	7,43	7,28	7,59	7,65	7,19	7,32	7,48
	1.4	3,85	4,92	7,05	7,23	7,47	7,27	7,23	7,55	6,82	7,28	7,38
2	2.1	3,63	4,12	6,76	6,96	7,38	7,01	7,39	7,43	7,04	7,08	7,59
	2.2	3,50	3,99	6,98	7,05	7,21	6,95	7,34	7,44	6,9	7,11	7,36
	2.3	3,56	4,18	6,33	6,69	6,82	6,67	6,81	7,08	6,71	6,82	7,19
	2.4	3,70	4,04	6,60	6,63	6,98	6,81	6,96	7,36	6,55	6,78	7,26

* Погрешность определения, согласно методике, составляет ±0,05 единиц pH.
** Исходная реакция среды образцов почв.

Определение концентраций тяжелых металлов также является важным этапом в оценке динамики изменения качеств почв после внесения почвенных добавок. Внесение торфа и вермикулита позволяет снизить концентрацию подвижных форм меди в 2,5, никеля в 2,7 и свинца в 2,1 раза. Переход элементов в менее подвижные формы связан с сорбционными свойствами добавок, незначительным повышением pH, а также «разбавлением» исходной пробы почвы. Стоит отметить, что разбавление характерно для всех почвенных образцов, в которые вносились почвоулучшающие добавки. Включение извести в состав добавки приводит к снижению содержания меди в 4,7, никеля в 3,9 и свинца в 2,3 раза за счет повышения реакции среды. Комплексная добавка с биочаром позволяет снизить концентрацию меди в 5,5, никеля в 6,6 и свинца в 4,6 раза, дополнительное снижение концентраций ТМ в эксперименте связано в первую очередь с сорбционными свойствами внесенного биочара. При использовании в составе комплексной добавки мелатонина наблюдалось снижение содержания меди в 4,4, никеля в 4,1 и свинца в 2,5 раза. Ввиду отсутствия у мелатонина возможности переводить ТМ в менее подвижные формы изменение концентраций связано с использованием извести. Изменение концентрации меди как основного поллютанта при внесении различных комплексных добавок представлено на рис.3. Как и на предыдущих этапах,

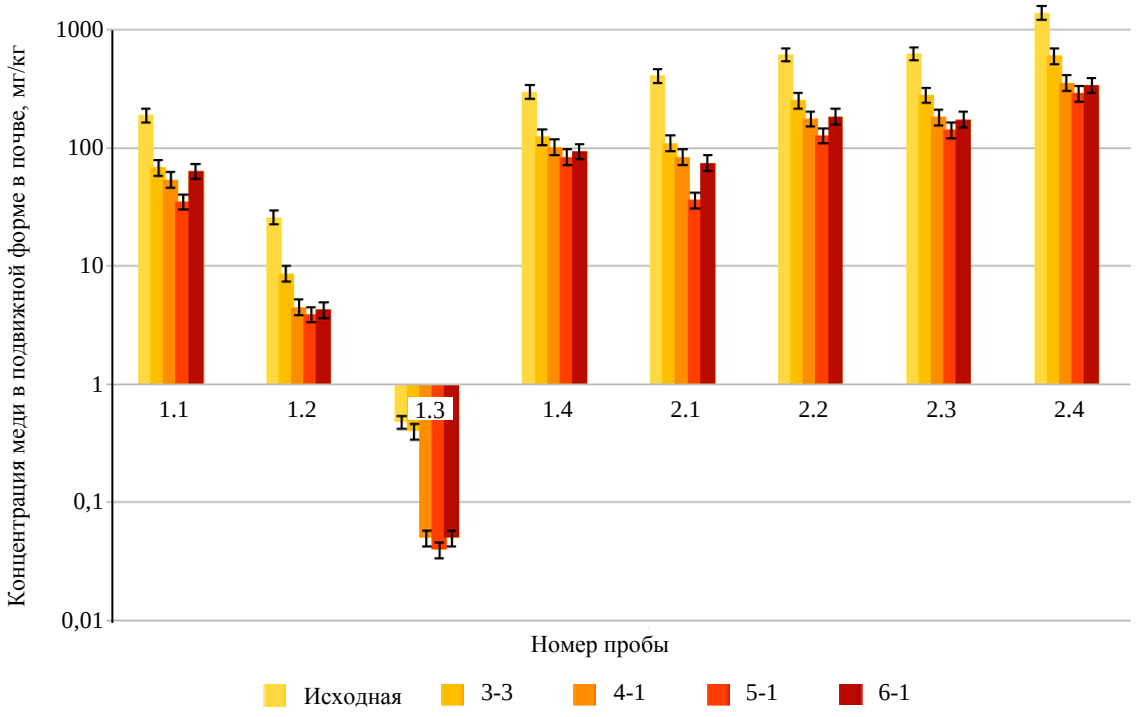


Рис.3. Концентрация меди в подвижной форме в экспериментах 3-3, 4-1, 5-1, 6-1 с разными почвенными добавками

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

наилучшие характеристики наблюдаются в экспериментах с использованием комплексных почвенных добавок с биочаром и мелатонином. Лучшие показатели снижения концентраций тяжелых металлов отмечены при использовании комплексной добавки с биочаром.

Оценка эффективности накопления тяжелых металлов растениями. Для сравнительной оценки наиболее перспективных комплексных добавок в отношении накопления ТМ использовались образцы эксперимента 3-3, так как их количество было достаточным для проведения анализа наземной части растений обеих групп и подземной части группы 1, в отличие от проб экспериментов 1-1, 2-1, 2-2, 2-3, 3-1, 3-2. На рис.4 представлена эффективность аккумуляции меди в растениях как основного поллютанта рассматриваемых образцов почв.

Среднее содержание меди в побегах растений при нормальном развитии составляет около 2-20 мг на 1 кг массы [48]. В анализируемых пробах содержание колеблется от 8 до 44 мг/кг. Наименьшее содержание меди наблюдается в пробах с добавлением биочара, наибольшее – в пробах с мелатонином. В среднем содержание меди в корнях обычно находится в пределах 20-200 мг/кг. В изучаемых пробах содержание меди достигает 440 мг/кг, что связано с защитными функциями растений. По полученным результатам видно, что использование биочара как почвенной добавки существенно снижает поступление меди в растения, а мелатонин, в свою очередь, повышает толерантность растений к воздействию таких высоких концентраций, не препятствуя их попаданию в растения. Данная картина соответствует не только меди, но и никелю и свинцу, что также подтверждает теоретические исследования.

Результаты экспериментальных исследований показали, что эффективным способом восстановления почвенно-растительного покрова на рассматриваемой территории Карабаша является применение комплексных почвенных добавок из торфа, вермикулита, извести с добавлением биочара или мелатонина. Для участков с составом почв группы 1 также подходит применение комплексной добавки из торфа, вермикулита и извести без внесения дополнительных почвоулучшителей. Расход компонентов и ориентировочная стоимость добавок представлены в табл.7.

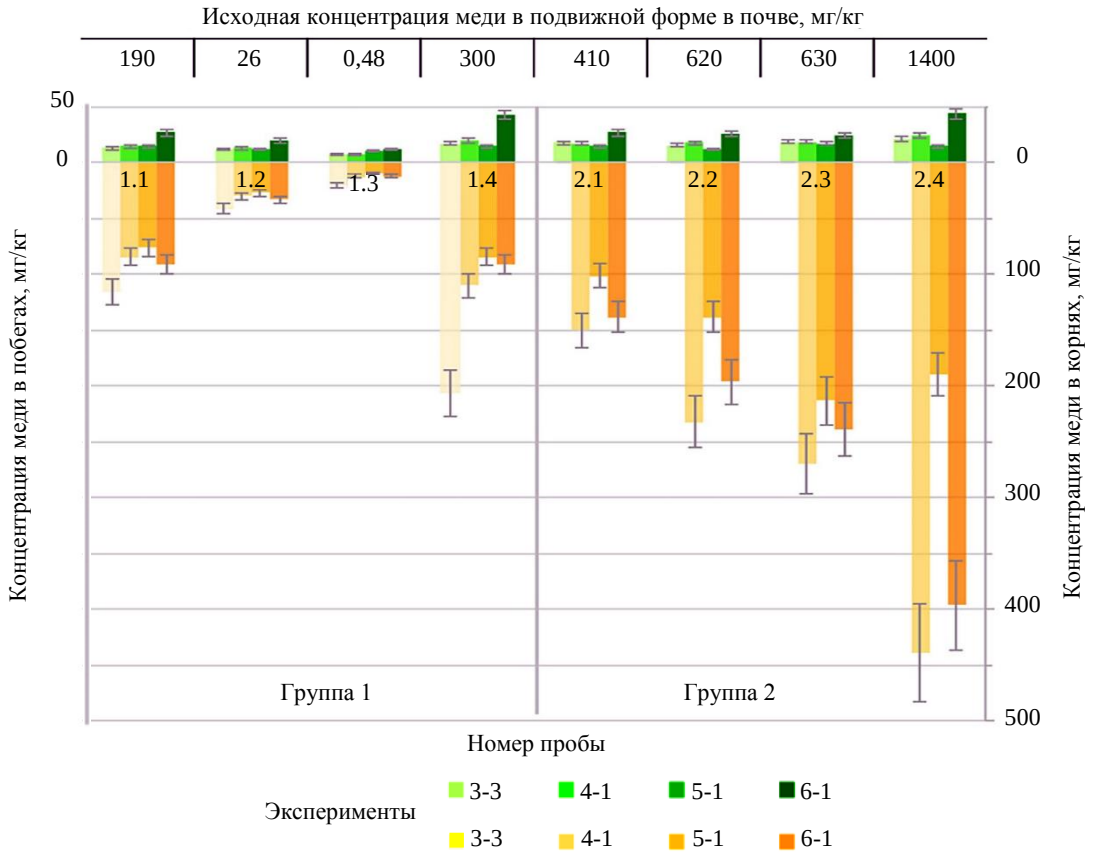


Рис.4. Концентрация меди в побегах (зеленый) и корнях (желтый) растений после эксперимента

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 7

Характеристика комплексных почвенных добавок

Состав	Расход компонента в составе, т/га					Ориентировочная стоимость, руб./т
	Известь	Торф	Вермикулит	Биочар	Мелатонин	
Известь (1Д), торф, вермикулит	300	1000	450	–	–	65000
Известь (1Д), торф, вермикулит, биочар				400	–	100000
Известь (1Д), торф, вермикулит, мелатонин				–	0,002	> 100000000

Известь показала эффективность за счет снижения подвижности элементов посредством повышения pH, биочар, согласно результатам эксперимента, эффективен как сорбент и сорбирует вещества еще до их попадания в корневую систему, а мелатонин повышает толерантность растений к ТМ, но практически не влияет на подвижность элементов в почве. Внесение торфа и вермикулита также снижает концентрации поллютантов за счет разбавления, сорбции и связывания в органические комплексы, а также за счет частичного повышения pH. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что решение проблемы загрязнения почв тяжелыми металлами в условиях кислой реакции среды возможно только с применением комплексных добавок, поскольку применение добавок по отдельности не позволит создать устойчивый противоэрозионный почвенно-растительный покров.

Заключение

Оценка эффективности использования различных почвенных добавок для решения проблемы восстановления почвенно-растительного покрова на кислых, загрязненных тяжелыми металлами почвах Карабаша показала следующее:

• Индивидуальное использование общераспространенных почвоулучшающих добавок (низинный торф, известь, вермикулит) не привело к получению положительных результатов, что еще раз подтвердило необходимость особого подхода к решению проблемы восстановления и озеленения подобных техногенных пустошей.

• Смесь торфа и вермикулита (соотношение почвы, торфа и вермикулита 8:2:1) даже за счет улучшения физико-механических и физико-химических свойств не позволила в рамках опытного вегетационного эксперимента получить устойчивый растительный покров.

• Внесение в состав смеси торфа и вермикулита однократной дозы извести привело к снижению подвижности тяжелых металлов (Cu, Ni, Pb) за счет повышения pH. По всем качественным и количественным показателям использование такой добавки благоприятно сказалось на группе образцов 1. Применение кратно увеличенных доз извести в составе комплексных добавок оказалось неэффективными для каждой группы и в большинстве экспериментов привело к угнетению растений.

• Добавление 10 мас.% биочара в состав комплексной добавки из извести, торфа и вермикулита привело к увеличению сорбционной способности по отношению к ТМ, особенно для группы 2 с максимальным уровнем загрязнения. По результатам эксперимента наблюдалось заметное снижение уровня накопление металлов в растениях и улучшение внешних признаков.

• Мелатонин (10 мкмоль/кг) повысил толерантность растений к ТМ. Как следствие, наблюдалось увеличение фитомассы растений и заметное улучшение их визуальных характеристик. Однако использование мелатонина в составе комплексной добавки из торфа и вермикулита не привело к снижению миграционной способности ТМ, что связано с механизмом его действия.

По итогам вегетационного опыта для апробации в полевых условиях предложены следующие комплексные почвенные добавки: для почв с pH > 3,9 и содержанием меди в подвижной форме до 100 ПДК подходит смесь торфа, вермикулита и извести; для почв с pH < 3,9 и содержанием меди более 100 ПДК рекомендуется использовать комплекс из торфа, вермикулита, извести и биочара. Данные решения являются оптимальными с эколого-экономической точки зрения для восстановления почвенно-растительного покрова Карабаша. Однако результаты исследования также указали на

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

перспективность для обеих групп почв использования комплексной добавки из торфа, вермикулита, извести и мелатонина. Это решение позволит не только сократить концентрации ТМ в подвижных формах, но и повысить толерантность растений к негативному воздействию загрязненной почвенной среды.

На следующих этапах работы планируется проведение исследований в полевых условиях с созданием опытных экспериментальных площадок на рассматриваемой территории Карабаша.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Копцик Г.Н.* Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 851-868. DOI: 10.7868/S0032180X14070077

2. *Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G.* Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – A review // Environmental Pollution. 2019. Vol. 249. P. 200-207. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.020

3. *Чукаева М.А., Кошенкова А.А., Малыгин Н.А. и др.* Биогеохимическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почвенно-растительного покрова Канонерского острова // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2025. Т. 80. № 1. С. 170-184. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.13

4. *Быкова М.В., Малюхин Д.М.* Оценка потенциала техногенных почвогрунтов на основе осадка сточных вод для рекультивации нарушенных земель горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 9. С. 36-52. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_36

5. *Баркан В.Ш., Лянгузова И.В.* Содержание тяжелых металлов в доминантных видах мхов как индикатор аэротехногенной нагрузки // Экология. 2018. № 2. С. 119-126. DOI: 10.7868/S0367059718020051

6. *Юркевич Н.В., Ельцов И.Н., Гуреев В.Н. и др.* Техногенное воздействие на окружающую среду в Российской Арктике на примере Норильского промышленного района // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 12. С. 230-249. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3207

7. *Рыкова Т.В.* Лесоводственно-экологическая оценка устойчивости сосновых экосистем к загрязнению среды тяжелыми металлами: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, 2024. 16 с.

8. *Данилов А.С., Кремчеев Э.А., Лозовая А.С., Гайдак В.О.* Мониторинг загрязнения почв Мончегорска: причины и последствия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 9. С. 53-66. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_53

9. *Шабанов М.В., Маричев М.С.* Геохимические аномалии тяжелых металлов в почвах природных и антропогенных ландшафтов (на примере Красноуральского промузла) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 6. С. 230-239. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3545

10. *Петухов А.С., Кремлева Т.А., Левчук Е.Д. и др.* Накопление тяжелых металлов в почвах и листьях березы повислой (*Betula pendula*) в условиях загрязнения городской среды // Теоретическая и прикладная экология. 2025. № 1. С. 83-91. DOI: 10.25750/1995-4301-2024-4-083-091

11. *Хохряков А.В., Студенок Г.А., Фролов С.Г., Рыбников П.А.* Территориальный эколого-технологический подход к обращению с объектами накопленного вреда окружающей среде как структурообразующий элемент системы обеспечения техносферной безопасности горнопромышленных регионов // Известия Уральского государственного горного университета. 2024. Вып. 2 (74). С. 132-141. DOI: 10.21440/2307-2091-2024-2-132-141

12. *Нуреев Р.Р., Пашкевич М.А., Харько П.А.* Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12. № 4. С. 169-179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013

13. *Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Нуреев Р.Р.* Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 155-167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32

14. *Залесов С.В., Бачурина А.В., Бачурина С.В.* Состояние лесных насаждений, подверженных влиянию промышленных поллютантов ЗАО «Карабашмедь», и реакция их компонентов на проведение рубок обновления. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2017. 276 с.

15. *Сальникова Ю.М., Стрелкова Ю.Ю.* Поиск эффективных решений по восстановлению растительного покрова на загрязненных почвах города Карабаш // Геология в развивающемся мире: Сборник научных трудов по материалам XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 10-12 апреля 2024, Пермь, Россия. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2024. С. 586-590.

16. *Горбунова В.Д., Менщиков С.Л.* Макроэлементный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в градиенте аэротехногенного загрязнения АО «Карабашмедь» // Лесной вестник. 2023. № 5. С. 170-178. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-5-170-178

17. *Окорков В.В.* К теории химической мелиорации кислых почв // Агрохимия. 2019. № 9. С. 3-17. DOI: 10.1134/S0002188119090096

18. *Sánchez-Castro I., Molina L., Prieto-Fernández M.-Á., Segura A.* Past, present and future trends in the remediation of heavy-metal contaminated soil – Remediation techniques applied in real soil-contamination events // Heliyon. 2023. Vol. 9. Iss. 6. № e16692. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16692

19. *Qayyum S., Khan I., Ke Meng et al.* A review on remediation technologies for heavy metals contaminated soil // Central Asian Journal of Environmental Science and Technology Innovation. 2020. Vol. 1. P. 21-29. DOI: 10.22034/CAJESTI.2020.01.03

20. *Wei Liu, Chenchen Zhao, Yanli Yuan et al.* Physicochemical Properties, Metal Availability, and Bacterial Community Structure in Cadmium-Contaminated Soil Immobilized by Nano-Montmorillonite // Frontiers in Environmental Science. 2022. Vol. 10. № 908819. DOI: 10.3389/fenvs.2022.908819

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

21. *Рудзиш Э., Петрова Т.А.* Оценка применимости осадка сточных вод в качестве добавки к почве для рекультивации земель, образованных при добыче полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10-2. С. 127-134. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_127

22. *Smirnov Yu.D., Suchkov D.V., Danilov A.S., Goryunova T.V.* Artificial soils for restoration of disturbed land productivity // Eurasian Mining. 2021. № 2. P. 92-96. DOI: 10.17580/em.2021.02.19

23. *Pukalchik M., Mercl F., Terekhova V., Tlustoš P.* Biochar, wood ash and humic substances mitigating trace elements stress in contaminated sandy loam soil: Evidence from an integrative approach // Chemosphere. 2018. Vol. 203. P. 228-238. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.181

24. *Menhas S., Xijia Yang, Hayat K. et al.* Pleiotropic melatonin-mediated responses on growth and cadmium phytoextraction of *Brassica napus*: A bioecological trial for enhancing phytoremediation of soil cadmium // Journal of Hazardous Materials. 2023. Vol. 457. № 131862. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131862

25. *Бондаренко Н.А., Степанов А.Ф., Прохорова Н.А.* Партерные газоны для Сибири // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2016. № 1 (21). С. 15-21.

26. *Тимошкин О.А., Тимошкина О.Ю., Тимощук Е.В.* Оценка травосмесей газонного типа в условиях лесостепи Среднего Поволжья // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021. Т. 22. № 5. С. 706-714. DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.5.706-714

27. *Lu-Lu He, Dao-You Huang, Quan Zhang et al.* Meta-analysis of the effects of liming on soil pH and cadmium accumulation in crops // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021. Vol. 223. № 112621. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112621

28. *Петрова А.Г., Слуковская М.В., Мосендз И.А. и др.* Оценка эффективности вермикулит-лизардитовых материалов для снижения подвижности потенциально токсичных металлов в торфяной почве // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты: Геологический институт КНЦ РАН, 2022. № 19. С. 290-295. DOI: 10.31241/FNS.2022.19.053

29. *Parmar S., Singh V., Sharma V.K. et al.* Effect of Vermiculite Soil Amendment on Immobilization of Selected Heavy Metals of Rhizospheric Zone of Maize // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2022. Vol. 53. Iss. 3. P. 384-395. DOI: 10.1080/00103624.2021.2017444

30. *Михайлов А.В., Пиирайнен В.Ю., Боброва Е.М., Смирнов А.И.* Анализ перспектив использования торфяных почвоулучшителей для рекультивации нарушенных земель // Горная промышленность. 2025. № 2. С. 124-130. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-124-130

31. *Кирдей Т.А.* Влияние гумусовых кислот низинного торфа на ремедиационные свойства растений пшеницы при комплексном загрязнении тяжелыми металлами // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. № 2. С. 228-235. DOI: 10.21285/2227-2925-2021-11-2-228-235

32. *Sijia Deng, Xinwei Lu, Xiuduan Chen et al.* Research on biochar remediation of heavy metal contaminated soil based on CiteSpace visual analysis // Clean Technologies and Environmental Policy. 2024. Vol. 26. Iss. 9. P. 2801-2817. DOI: 10.1007/s10098-024-02767-5

33. *Yining Gao, Pan Wu, Paramsothy Jeyakumar et al.* Biochar as a potential strategy for remediation of contaminated mining soils: Mechanisms, applications, and future perspectives // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 313. № 114973. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114973

34. *Iqbal N., Tanzeem-ul-Haq H.S., Gull-e-Faran et al.* Soil Amendments and Foliar Melatonin Reduced Pb Uptake, and Oxidative Stress, and Improved Spinach Quality in Pb-Contaminated Soil // Plants. 2023. Vol. 12. Iss. 9. № 1829. DOI: 10.3390/plants12091829

35. *Xie Zhiming, Ghafoor A, Munir M. et al.* Reclaiming multi-contaminated soil: melatonin alleviates cadmium and microplastic toxicity to restore rice growth and yield // RSC Advances. 2026. Vol. 16. Iss. 10. P. 8558-8572. DOI: 10.1039/d5ra10106a

36. *Meng Na, Chenyang Zhang, Shangqi Xu et al.* Melatonin application enhances the remediation of cadmium-contaminated soils by *Cinnamomum camphora* // Science of The Total Environment. 2025. Vol. 968. № 178912. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178912

37. *Fayuan Wang, Shuqi Zhang, Peng Cheng et al.* Effects of Soil Amendments on Heavy Metal Immobilization and Accumulation by Maize Grown in a Multiple-Metal-Contaminated Soil and Their Potential for Safe Crop Production // Toxics. 2020. Vol. 8. Iss. 4. № 102. DOI: 10.3390/toxics8040102

38. *Sánchez N., Merbach I., Drabesch S. et al.* Bioavailability and phyto-extractability of metals in a peat-amended agricultural soil under climate stress // Journal of Environmental Management. 2025. Vol. 394. № 127167. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.127167

39. *Xinyi Nie, Xianhuai Huang, Man Li et al.* Advances in Soil Amendments for Remediation of Heavy Metal-Contaminated Soils: Mechanisms, Impact, and Future Prospects // Toxics. 2024. Vol. 12. Iss. 12. № 872. DOI: 10.3390/toxics12120872

40. *Кременецкая И.П., Слуковская М.В., Иванова Л.А. и др.* Агрохимическая оценка влияния вермикулита на снижение подвижности ионов аммония // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2025. Т. 20. № 4. С. 606-617. DOI: 10.22363/2312-797X-2025-20-4-606-617

41. *Данилова Е.Д., Злобин И.Е., Ефимова М.В.* Кратковременная предобработка мелатонином повышает устойчивость растений ячменя к последующему действию кадмия // Физиология растений. 2023. Т. 70. № 5. С. 484-493. DOI: 10.31857/S0015330323600225

42. *Холодова В.П., Васильев С.В., Ефимова М.В. и др.* Экзогенный мелатонин защищает растения рапса от токсического действия избытка меди // Физиология растений. 2018. Т. 65. № 6. С. 463-471. DOI: 10.1134/S0015330318060088

43. *Moustafa-Farag M., Elkelish A., Dafea M. et al.* Role of Melatonin in Plant Tolerance to Soil Stressors: Salinity, pH and Heavy Metals // Molecules. 2020. Vol. 25. Iss. 22. № 5359. DOI: 10.3390/molecules25225359

44. *Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С.* Исследование продуктивности, морфометрических и физиолого-биохимических показателей контрастных по устойчивости к свинцу сортов ярового двурядного ячменя // Агрохимия. 2019. № 10. С. 72-84.

45. *Петрова Т.А., Рудзиш Э.* Метод оценки эффективности мелиорантов при рекультивации нарушенных земель // Вестник Евразийской науки. 2021. Т. 13. № 6. 12 с.

46. *Скугорева С.Г., Фокина А.И., Домрачева Л.И.* Токсичность тяжелых металлов для растений ячменя, почвенной и ризосферной микрофлоры // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 2. С. 32-45.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

47. *Чукаева М.А., Петров Д.С., Малыгин Н.А.* Использование белокрыльника болотного в условиях Севера для фиторемедиации промышленных сточных вод от металлов на примере АО «Карельский окатыш» // Арктика: экология и экономика. 2025. Т. 15. № 3. С. 116-126. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-116-126

48. *Flávio José Rodrigues Cruz, Raphael Leone da Cruz Ferreira, Susana Silva Conceição et al.* Copper Toxicity in Plants: Nutritional, Physiological, and Biochemical Aspects // Advances in Plant Defense Mechanisms. IntechOpen, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.105212

***Авторы*: Вера Анатольевна Матвеева,** *канд. техн. наук, директор научного центра* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *Matveeva_VA2@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0001-9893-380X*, **Дмитрий Олегович Нагорнов,** *канд. техн. наук, доцент* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-9932-8836*, **Юлия Мелановна Сальникова,** *инженер учебно-научной лаборатории* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0009-0001-4443-819X*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0